



Université de Montpellier pour les Sciences du vivant et de l'Environnement et  
des Sciences et Technologies

Ecole Doctorale GAIA - Biodiversité Agriculture Alimentation Environnement  
Terre Eau

## Intensification écologique « au Sud »: quelles marges de manœuvre des exploitations familiales ?

Mémoire présenté pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches

*François Affholder, 2016*

*Chercheur Cirad, UPR AïDA - Agroécologie et Intensification Durable des Systèmes de culture  
Annuels.*





## Remerciements

Je suis évidemment redevable aux près de 130 personnes citées dans ce document pour avoir contribué aux publications scientifiques auxquelles je suis associé, ou pour leur influence sur mon parcours, par leur enseignement, leur rôle de responsable ou simplement leurs conseils ou critiques. Le fait de présenter ma carrière et d'employer la 1<sup>ère</sup> personne pour tirer un bilan de ces articles ne me fait en aucun cas oublier à quel point toute la production scientifique revendiquée dans ce mémoire est une œuvre collective.

Quant à ma famille et mes amis, je leur dois de m'avoir motivé aussi pour autre chose que mon travail. Loin de moi l'idée qu'ils aient une quelconque culpabilité pour la faiblesse de ma production écrite ou ma propension à dire non à bien des collègues (et amis) me sollicitant au plan professionnel ! Bien au contraire, je pense qu'ils m'ont protégé des impacts les plus négatifs de mon pire défaut : celui de croire que je peux tout apprendre, tout faire, tout promettre... Ils m'ont ainsi aidé à me discipliner un peu et ceux qui trouveraient que c'est insuffisant, ce que je peux comprendre, n'ont sans doute pas idée de ma capacité « naturelle » à la turbulence !

## Préambule d'ordre grammatical

Dans ce texte, j'ai adopté la règle suivante pour les accords de genre. Lorsque l'accord concerne deux qualificatifs de genre opposé, l'accord est fait sur le qualificatif le plus proche du mot à accorder. Ce texte n'est donc pas grammaticalement correct, je m'en excuse pour les cas qui ne relèveraient pas de cette règle et qui m'auraient malheureusement échappés, mais j'espère que sur ce point d'incorrection particulier de l'accord des genres, le lecteur et la lectrice n'en seront pas gênés...



Partie A .....	7
Présentation du candidat, Curriculum Vitae .....	7
1. Parcours.....	9
1.1- Profil scientifique .....	9
1.2 Formation .....	9
1.3 Activités associatives et électives, distinctions honorifiques.....	10
1.4 Parcours résumé.....	10
1.5 Parcours commenté .....	11
2. Publications .....	17
2.1. Vue générale.....	17
2.2- Revues à comité de lecture .....	19
2.3- Projets soumis dans revues à comité de lecture.....	20
2.4 Communications de colloques avec actes.....	21
2.5.- Communication à colloques sans actes .....	24
2.6- Chapitres d'ouvrage .....	24
2.7-Mémoires académiques.....	27
3. Encadrements de travaux d'étudiants .....	27
3.1.- Mémoires de master 2 et spécialité d'ingénieur encadrés.....	27
3.2- Mémoires d'étudiants de niveau Master 2 co-encadrés (études interdisciplinaires) .....	28
3.3- Tutorat de rédaction de mémoires d'étudiants Master 1 ou 2 <sup>e</sup> année de cursus d'ingénieur .....	29
3.4- Travaux de doctorat encadrés comme co-encadrant principal .....	29
3.5- Travaux de doctorat encadrés comme co-encadrant secondaire .....	30
3.6- Travaux de doctorat ayant fait l'objet d'un encadrement spécifique de ma part sur un chapitre de thèse.....	30
3.7- Travaux de thèse en cours .....	30
4. Financement de mes activités.....	31
5. Activités d'enseignement et de formation.....	32
6. Réseau de collaborations .....	33
Partie B .....	36
Bilan des travaux .....	36

1. Cadre général : quelle marge de manœuvre technique des producteurs pour l'intensification écologique en fonction de l'environnement biophysique et économique des exploitations .....	38
2. Evaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture existants et des « prototypes de l'intensification écologique ».....	41
3. Evaluation bio-économique des systèmes de culture.....	50
4. Problèmes méthodologiques de l'évaluation intégrée des systèmes de production.....	59
Partie C .....	79
Projet de recherche .....	79
1. Futur marché, Futur Climat, une place pour l'intensification écologique dans l'agriculture familiale du futur ? .....	83
2. Futures fermes, futurs climats : futurs systèmes de culture écologiquement intensifs.....	85

## **Partie A**

### **Présentation du candidat, Curriculum Vitae**





## 1. Parcours

François Affholder, 54 ans, né le 21 juin 1962 à Metz (57), marié, deux enfants.

Ingénieur Agronome, Docteur en Sciences Agronomiques,

Chercheur en Agronomie, unité de recherche AïDA (Agroécologie et Intensification Durable des Systèmes de culture Annuels), département PERSYST (Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux), au Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement)

Enseignant consultant.

Adresse : Cirad, Unité de Recherche AïDA (Agroécologie et Intensification Durable des systèmes de culture Annuels), TA B 102/02, Avenue d'Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5. Tel : +33 4 67 61 59 51. E-mail : [francois.affholder@Cirad.fr](mailto:francois.affholder@Cirad.fr)

### 1.1- Profil scientifique

Spécialités : Agronomie, Modélisation mathématique de systèmes complexes

Thématiques : Ecosystèmes cultivés tropicaux, Changement climatique, Intensification écologique en agriculture familiale

Activités : Recherche, enseignement, coordination de projet, animation scientifique

Expertise pays : Milieux semis arides à subhumides d'Afrique, Asie et d'Amérique Latine, milieux insulaires et enclavés. Connaissance approfondie des agricultures de subsistance et en voie d'intégration au marché en Afrique au Sud du Sahara, au Brésil Central et en Asie du Sud-Est Continental par des affectations de longue durée (2 ans aux Comores, 3 ans au Sénégal, 5 ans au Brésil, 5 ans au Vietnam) et des missions régulières dans ces régions.

Langues : Français langue maternelle, Portugais (Brésil) : courant (lu, écrit, parlé), Anglais : courant (lu, écrit, parlé)

### 1.2 Formation

**2001** : Docteur en sciences agronomiques, Institut National Agronomique Paris-grignon. Mention très honorable avec les félicitations à l'unanimité du jury.

**1989** : Ingénieur en Agronomie Tropicale (DAT), Centre National d'Enseignement Agronomique des régions Chaudes, Montpellier

**1986** : Ingénieur Agronome (Diplôme d'Agronomie Approfondie, DAA), Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, spécialité Maîtrise de l'Eau et du Bioclimat.

**1985** : Diplôme d'Agronomie générale (DAA), Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

**1983** : Math Spé Bio, Lycée Chateaubriand, Rennes.

**1982** : Math Sup Bio, Lycée Chateaubriant, Rennes.

**1981** : Baccalauréat, série C, lycée David d'Angers, Angers.

### 1.3 Activités associatives et électives, distinctions honorifiques

Chevalier de l'ordre du Mérite Agricole (2016)

Membre de l'Association Française d'Agronomie.

Membre de la Société Européenne d'Agronomie.

Membre de l'association "Nature Science Sociétés" (1993-1997).

Membre de l'association "Association of Farming System Research and Extension" (1994-1999).

Membre, trésorier de l'association "Association pour le Développement Rural" (1992-1999).

Trésorier du comité de Site "Brésil-Chili-Bolivie" du Cirad (1995-1999).

Membre du Club Alpin Français depuis 1975.

Elu au comité d'entreprise du Cirad (2006-2009).

Elu au Conseil d'Administration du Cirad (2011-2015).

### 1.4 Parcours résumé

**04/2016-** : Cirad-UPR AïDA

Animateur d'équipe, Chargé de recherches, enseignant consultant

**01/2015-03/2016** : Cirad-UPR AïDA

Chargé de recherches, enseignant consultant.

Administrateur élu du Cirad (jusqu'à fin 2015).

**04/2010 – 12/2014**: Cirad-URSCA France

Chargé de recherche, enseignant consultant,

Administrateur élu du Cirad (à partir de 2011)

**09/2006 - 04/2010** : Cirad / UMR System France

Animateur d'équipe, chargé de recherche, enseignant consultant.

Elu au Comité d'entreprise du Cirad, Rapporteur de la commission « mobilité géographique » (jusqu'en 2009).

**01/2003 - 09/2006** : Cirad / IRRI/ VASI-NOMAFSI Vietnam

*Principal Scientist*, IRRI, chef de projet.

Elu au Comité d'entreprise du Cirad, Rapporteur de la commission « mobilité géographique » (à partir de 2006).

**01/1999 - 01/2002** : Cirad-Montpellier France

Chargé de recherche.

Réalisation d'une thèse de doctorat, conduite de projets de recherche

**01/1994 - 01/1999** : Cirad/EMBRAPA-CPAC - Brasilia Brésil

Chef de projet, chargé de Recherches

**01/1992 - 01/1994** : Cirad - Montpellier France

Chargé de recherches.

**01/1989 - 01/1992** : Cirad/ISRA - Bambey Sénégal

Directeur adjoint du laboratoire d'Agroclimatologie de l'ISRA, Chargé de recherches.

**01/1987 - 01/1989** : Ministère français de la coopération et du développement – Moroni, République Fédérale Islamique des Comores.

Agronome - chargé d'expérimentation.

## 1.5 Parcours commenté

### *Une formation agronomique*

Je suis venu aux études agronomiques, puis à la recherche dans ce domaine, en grande partie parce que parmi les questions de ma jeunesse auxquelles ni mes parents ni mes enseignants ne proposaient de réponse convaincante, il y avait celle de la cause voulant que l'écrasante majorité des agriculteurs de la planète soient d'une pauvreté extrême, alors même que produire de la nourriture paraît à la fois indispensable à l'humanité et pas particulièrement facile à réussir en quantité suffisante.

A l'âge où l'on doit choisir ses études, les seuls livres qui m'apportaient un éclairage pertinent sur ce paradoxe de la pauvreté des ruraux étaient ceux d'un agronome, de surcroît assez révolutionnaire et charismatique pour fonder l'écologie comme mouvement politique: René Dumont. Pour un jeune homme cherchant, avec un snobisme certain, une raison de travailler qui aille au-delà de la simple contingence matérielle, l'agronomie orientée vers le développement devenait une piste dont le seul inconvénient, pour l'alpiniste que je prétendais être également, était qu'elle ne menait pas nécessairement aux montagnes les plus nobles...Mais j'ai pu mesurer par la suite combien la suivre ressemblait bel et bien à l'alpinisme...

Entré à l'école d'Agronomie de Montpellier, après deux années de classes préparatoires au lycée Chateaubriand de Rennes, j'ai eu la chance de bénéficier entre autres de l'enseignement marquant de Louis Malassis. Ce dernier m'a conseillé la lecture de l'ouvrage de W. Murdoch qui venait d'être publié en Français: « la faim dans le monde, surpopulation et sous-alimentation » (1985). Cette lecture, marquante elle aussi, acheva de me convaincre de la place considérable des causes politiques et économiques dans le paradoxe de la pauvreté des ruraux. Mais le reste de l'enseignement agronomique dont je bénéficiais, sans oublier l'expérience d'un stage dans une exploitation ovine de montagne en France, me révélait aussi la complexité technique de la production agricole et sa dépendance à la variabilité de l'environnement naturel. Me sentant plus d'affinité pour les sciences biophysiques que pour les sciences sociales, j'ai voulu renforcer d'abord ma formation sur cet aspect de l'agronomie, en choisissant pour spécialité d'Ingénieur « Maîtrise de l'Eau et du Bioclimat », une formation de fin d'études d'ingénieur agronome construite et dispensée conjointement par les écoles nationales supérieures agronomiques de Paris et Montpellier et par l'ENGREF (Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts)...La suite de mon parcours doit beaucoup à la qualité des enseignements dispensés là, notamment par Jacques Wery qui officiait déjà là, J.P. Luc, J.P. Lhomme, B. Itier, A. Perrier, et aussi F. Forest, qui intervenait comme conférencier et qui véhiculait une image extrêmement dynamique de son équipe au Cirad.

### *Stage de fin d'études, premiers contrats : déjà le sud, décidément le Sud.*

C'est pour le stage de cette 3<sup>e</sup> année d'études d'ingénieur que j'ai eu ma première expérience avec le Cirad, de mai à octobre 1986, justement avec cette équipe. Sous l'encadrement de F.N. Reyniers et S. Valet, de la « Division Evaluation et Valorisation de l'Eau », et en partenariat avec S. Traoré et S. Sanogo de l'IER (Institut d'Economie Rurale) au Mali, j'ai réalisé une étude alliant observations de

terrain et modélisation, donnant lieu à un mémoire intitulé « Suivi multilocal de l'enracinement du sorgho au Mali, conséquence sur la réserve utile racinaire ». A l'issue de ce stage, le Cirad m'a permis d'approfondir quelque peu mon travail dans le cadre d'un contrat de quelques mois.

A peu près sûr, à ce stade, de mon engagement vers « le Sud », j'hésitais encore entre recherche et ingénierie, pour la direction à donner à mon cheminement professionnel. Afin de disposer de davantage d'éléments pour me déterminer, j'ai effectué une année supplémentaire au CNEARC (devenu IRC), en 1986-1987 pour devenir Ingénieur d'Agronomie Tropicale, avec une spécialisation « Développement ».

J'ai commencé mon activité professionnelle en 1987 comme volontaire du Service National en République Fédérale Islamique des Comores. J'y étais, jusqu'en mai 1989, « chargé d'expérimentation » au sein d'un projet de « Recherche/ Développement » du Ministère Français de la Coopération. En collaboration étroite avec Mbae Abdou, un collègue Comorien, aussi fraîchement diplômé que moi, nous conduisions un dispositif multilocal, chacun avec une responsabilité plus directe sur certains sites, dans le but de produire des références sur les performances agronomiques de divers systèmes de culture envisagés pour répondre aux problèmes de durabilité des systèmes agraires de Grande Comore. Notre dispositif couvrait à peu près toute la palette, extrêmement variée, des environnements biophysiques de l'île (de 300 à 7000 mm de précipitations annuelles, et des sols sur matériaux d'éruptions volcaniques de tous âges, pour ne citer que ces composantes de l'environnement), et aussi pratiquement toute la palette des « prototypes » de ce que l'on ne qualifiait pas encore d'agriculture écologiquement intensive : agroforesterie, notamment avec arbustes fixateurs d'azote, plantes de couverture, et jachères améliorées....Une occasion fantastique de me familiariser avec la complexité des interactions entre système de culture et environnement ! Pendant cette mission j'ai réalisé également mon mémoire d'ingénieur d'agronomie tropicale, que je devais encore au CNEARC. Ce travail, donnant lieu à un document intitulé « La jachère améliorée : une voie d'association de l'agriculture et de l'élevage dans le Hamahamet » a été réalisé avec Muriel Figuié, qui est ma compagne depuis cette époque. Au cours de ce contrat, j'ai interagi avec et été encadré par (encore qu'à distance...considérable, mais avec quand même quelques missions d'appui) des chercheurs (notamment P. Quantin, pédologue de l'ORSTOM (devenu l'IRD) et des acteurs clefs de la promotion de la « Recherche Développement » au sein du ministère de la coopération et des ONG telles que le GRET et l'IRAM (notamment F. Dreyfus).

Quelques mois avant la fin de mon contrat, F.N. Reyniers, du Cirad, s'est rappelé à mon bon souvenir en me proposant un poste en CDI, avec une affectation au Sénégal...dès que possible. N'ayant toujours pas tranché entre recherche et ingénierie, comme correspondant le mieux à mes capacités ou à mon souhait de me sentir utile, et identifiant le Cirad comme une entreprise ouverte sur les deux possibilités, j'ai accepté ce que je voyais en première analyse comme une opportunité de retourner au Sahel, que je me sentais mieux armé pour comprendre, avec mes quelques années d'expérience et surtout avec le soutien d'une équipe comme celle qui me recrutait et qui était pratiquement une équipe de rêve, dirigée par quelques quadragénaires expérimentés, clairement porteurs d'une vision et bourrés d'énergie (Francis Forest, F.N. Reyniers), entourés de solides experts (J. Imbernon, B. Lidon entre autres), et en phase active de croissance puisque j'y retrouvais quelques collègues de ma génération eux-aussi récemment embauchés ou en voie de l'être (P. Perez, M. Vaksman, S. Marlet, C. Baron, E. Scopel, A. Clopes, B. Muller).

## *Le Cirad, décidément, et de l'ingénierie à, finalement, la recherche !*

Je suis donc entré au Cirad en mai 1989 et j'y ai effectué toute ma carrière à ce jour, passant progressivement d'un métier où l'ingénierie était prépondérante, vers un métier de chercheur.

Dans ce qui suit, les abréviations RCL, CCA, CC, CO, ME, DOC et MA, renvoient à mes publications référencées par catégorie (respectivement Revue à Comité de Lecture, Communications de Colloques avec Actes, Communications de Colloques sans actes, Chapitres d'Ouvrages, Mémoires d'étudiants Encadrés, DOCTORATS encadrés, et mes propres Mémoires de travaux Académiques).

### *1989-1992 Agroclimatologue à l'ISRA au Sénégal*

J'ai été d'abord et immédiatement affecté au Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey au Sénégal jusqu'en 1992, comme adjoint au directeur de l'unité d'Agroclimatologie de l'ISRA (Institut Sénégalais de recherche Agronomique), Madiagne Diagne. J'y ai contribué à deux types d'activités. D'une part une activité d'ingénierie, dans le cadre d'un projet régional de grande ampleur du ministère français de la coopération, le projet « Evaluation et Suivi de la Production Agricole en fonction du Climat et de l'Environnement ». Ce projet a permis la mise au point rapide d'un outil de suivi agroclimatique de la saison des pluies et d'estimation précoce des rendements des céréales en cours de saison des pluies, dès 1990 et pendant plus de deux décennies utilisé en routine par le centre international AGRHYMET de Niamey (Samba, 1998) : le logiciel DHC (Diagnostic Hydrique des Cultures) (Forest and Cortier, 1991). Nos recherches ont aussi abouti à la génération suivante de ce type d'outil avec SARRA (Système d'Analyse Régionale du Risque Climatique) (Affholder, 1997; Baron et al., 1999; Forest, 1996) devenu aujourd'hui Sarra-H (Dingkuhn et al., 2003), utilisé à son tour au centre AGRHYMET (Traore et al., 2014). D'autre part cette affectation a été l'occasion du début de mes activités de recherche, avec un travail sur le thème de l'interaction entre risques de stress hydrique et intensification des cultures, qui a donné lieu à mes toutes premières publications, soit deux articles de revue à comité de lecture (RCL1, RCL2), un chapitre d'ouvrage (CO1) et trois communications à colloques (CCA1, CCA10, CC1).

J'ai eu la chance de passer ensuite un an à Montpellier dans un environnement plus favorable à la recherche bibliographique et à l'écriture -nous n'étions pas encore à l'ère d'internet et la communication entre Bambey et le reste du monde reposait essentiellement sur le Telex... et le transport par la route des précieux feuillets entre Dakar et Bambey !

### *1994-1999 : Agronome, EMBRAPA-Cerrados, laboratoire de « biophysique de l'environnement », Brésil.*

Je suis parti fin 1993 au Brésil, affecté à Brasilia auprès de l'EMBRAPA –Cerrados (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Institut de Recherche Agropastorale du Brésil, centre régional pour les Cerrados) comme responsable d'un projet baptisé « Connaissance et gestion des hydrosystèmes agricoles des Cerrados » au sein du programme « gestion des ressources naturelles » dirigé par Eduardo Assad. Ma mission comportait là encore un important volet ingénierie et expertise, assez similaire à celui de ma mission précédente. Il s'agissait de l'adaptation du modèle Sarra pour cette nouvelle région, et la formation d'une équipe de techniciens de l'EMBRAPA à son utilisation. Cet outil est aujourd'hui utilisé en routine pour produire les références nécessaires au calcul des primes

d'assurances du système national brésilien de protection des agriculteurs contre les risques de sécheresse (Affholder et al., 2006; Rossetti, 2001). En contrepartie de ce travail d'ingénierie, j'avais en quelque sorte la liberté de développer un projet de recherche s'inscrivant dans la problématique générale des risques liés aux variations interannuelles et spatiales du climat. C'est à cette occasion que j'ai élargi ma perspective d'agroclimatologue à celle d'agronome du système de culture collaborant avec des économistes de l'exploitation agricole. Je me suis appuyé en particulier sur un projet de « recherche-développement » en collaboration entre le Cirad et l'EMBRAPA conduit à cette époque dans une région d'agriculture familiale des Cerrados, le « Projet Silvânia », dirigé par Philippe Bonnal pour le Cirad et Luis Fernando Zoby pour l'EMBRAPA, et où je suis venu m'intégrer à une équipe pluridisciplinaire composée de pédologues, géographes, économistes, et sociologues. Ce projet a été extrêmement marquant pour moi :

- en ce qu'il a contribué à une véritable révolution agricole permettant la sortie de la pauvreté de très nombreux agriculteurs de la région couverte directement par le projet ;
- en ce qu'il a inspiré ensuite la politique agricole du Brésil en faveur de l'agriculture familiale (PRONAF ; Murilo Flores, secrétaire d'Etat à la Réforme Agraire et au Développement Rural, Comm. Pers.; Luis Fernando Zoby, Comm. Pers.).
- en ce qu'il a été l'occasion pour moi d'éprouver la pertinence de la modélisation bio-économique des exploitations agricoles pour comprendre les trajectoires des exploitations lorsque leur environnement économique change fortement, mais aussi le fait que cette pertinence est conditionnée par la qualité de l'information relative aux systèmes de culture dans les modèles d'exploitation.

#### *2000-2001 : rédaction d'une thèse de doctorat*

Début 1999 j'ai quitté le Brésil pour me consacrer, à Montpellier, à une thèse de doctorat fondée sur mon travail dans le projet Silvânia, dirigée par A. Capillon et soutenue fin 2001 (MA3). Ce travail de thèse a été l'occasion de collaborations qui m'ont particulièrement marqué. Notamment avec Nadine Brisson qui m'a donné les clefs du modèle de culture Stics et avec José Madeira da Silva Neto, qui grâce à son enthousiasme et sa patience a réussi à me faire comprendre bien des aspects, jusque là parfaitement obscurs pour moi, de la science du sol, ouvrant ainsi la voie à Hubert Manichon pour me faire découvrir le profil cultural. Les échanges avec mes rapporteurs, Bernard Seguin et Jacques Wéry, ont été aussi très structurants de ma réflexion pour la suite de mon parcours.

L'ensemble de cette période brésilienne a donné lieu à la production, outre cette thèse, de 7 articles de revue à comité de lecture dont trois comme 1<sup>er</sup> auteur (RCL3, RCL7, RCL8, RCL10, RCL11 traduit en Portugais dans RCL12, RCL17, RCL20), cinq communications à colloques (CCA2, CCA6, CCA7, CCA8, CCA11), et 5 chapitres d'ouvrage (CO2, CO3, CO6, CO9, CO10). J'ai encadré 3 stages de master (ME1, ME2, ME3).

#### *2003-2006 : Chef de projet, IRRI- VASI, Vietnam.*

En 2002 j'ai suspendu mon contrat avec le Cirad pour pouvoir accompagner mon épouse au Vietnam, où son activité professionnelle la conduisait mais où le Cirad n'avait pas d'affectation à me proposer. Après un temps consacré à jouir davantage de ma famille et de ma passion de grimpeur et alpiniste, j'ai construit sur place un projet de collaboration avec l'IRRI (International Rice Research Institute, centre du CGRAI –Consultative group for International Agricultural Research) et le système national

Vietnamien de recherche, dans le prolongement d'une coopération existante, le projet « Systèmes Agraires de Montagne ». Ce projet, co-piloté avec Dang Dinh Quang au sein du NOMAFSI (Northern Mountains Agriculture and Forestry Science Institute) dirigé par Le Quoc Doanh, m'a permis de reprendre au Vietnam le cours de ma carrière scientifique à partir de 2003, en tant que mis à la disposition de l'IRRI, dans son département « Crop, Soil and Water Sciences » dirigé par To Phuc Tuong. Bien que seul agent de l'IRRI en poste au Vietnam, j'ai pu participer aux débats internes et à l'animation scientifique de l'IRRI, à distance mais aussi à l'occasion de voyages réguliers au siège philippin ainsi qu'à divers ateliers organisés en Asie du Sud Est. J'ai en particulier collaboré avec des collègues de l'IRRI, dont notamment Sushil Pandey, pour l'élaboration d'un projet qui a été soumis avec succès à l'appel international « Challenge Program Water and Food ». Ce projet a été l'occasion d'accroître la dimension internationale de mon partenariat, avec la participation d'un autre centre du CGIAR, l'ICRAF, de l'université de Chiang Mai (Thaïlande) du NAFRI (Laos) et de l'université de Californie (Davis), et de diversifier les compétences Vietnamiennes impliquées dans nos activités, grâce à la participation de l'université TUEBA (Thai Nguyen University of Economics and Business administration). Au cours de mon affectation au Vietnam, c'est-à-dire jusqu'en fin 2006, une part très significative de mon temps a ainsi été consacrée à des missions de construction de partenariat, de formation, d'élaboration et de coordination de projets. Ces derniers avaient notamment pour finalités principales le soutien au système de recherche agricole du Vietnam pour la formation de ses ingénieurs aux approches systémiques et surtout pour la création d'un centre de recherche dédié aux régions de montagne du Nord du pays, le tout vu comme facteurs nécessaires à une « révolution doublement verte » dans cette région. Une part de mon temps restait cependant dédiée à la production de connaissances, la question principale intéressant à la fois l'IRRI, le Cirad et le VASI (Vietnam Agricultural Science Institute) étant la question de l'estimation de l'attractivité économique de l'agriculture de conservation pour les agriculteurs des montagnes d'Asie du Sud Est, compte tenu d'une part des espoirs placés notamment par le Cirad et l'AFD (Agence Française de Développement) dans ces techniques de production depuis de nombreuses années, les conduisant à affecter des moyens importants à leur promotion auprès des agriculteurs, et d'autre part de l'échec à peu près complet de leur diffusion au Vietnam comme dans la plupart des régions du monde couvertes par les dispositifs conjoints de l'AFD et du Cirad. J'ai maintenu aussi, au cours de ces années, une collaboration à distance avec mes collègues du Cirad et de l'Embrapa au Brésil, portant sur l'évaluation de l'impact de l'agriculture de conservation sur le bilan hydrique et le rendement des cultures.

Au total cette période d'affectation au Vietnam a donné lieu à trois articles de revue à comité de lecture (RCL4, RCL5, RCL16) et 5 communications à colloques (CCA4, CCA17, CCA18, CCA19, CCA27). J'ai contribué à l'encadrement de 2 stages de niveau master 2 (ME14, ME15).

#### *2006-2010 : UMR SYSTEM, Montpellier*

A mon retour en France en 2006, j'ai rejoint l'UMR SYSTEM avec à partir de 2007 la coordination scientifique et budgétaire de l'équipe SAMBA « Systèmes Agroécologiques Multi-espèces à bases d'Annuelles » ainsi qu'une mission d'enseignant consultant m'impliquant notamment dans le master « Production Végétale Durable » de Montpellier-Supagro. J'ai conduit la construction du projet scientifique de mon équipe, porté son bilan lors son évaluation quadriennale en 2010, et participé à l'élaboration du projet scientifique de l'UMR System jusqu'à ce qu'une décision de la direction du Cirad lui impose un changement de « périmètre » conduisant l'équipe SAMBA à rejoindre une autre

unité du Cirad, l'unité SCA (Systèmes de Culture Annuels) en 2009. Au cours de cette période, j'ai contribué depuis Montpellier à l'élaboration, à l'animation et à la mise en œuvre de projets de recherche couvrant les terrains d'Afrique de l'Ouest, Amérique Latine et Asie sur lesquels j'avais précédemment développé mon expertise au cours de mes postes en expatriation. J'ai apporté à ces projets notamment mes compétences et réseaux de collaboration en modélisation des cultures et modélisation bioéconomique d'exploitation. J'ai élargi mes questions de recherche aux problèmes méthodologiques de l'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture. J'ai commencé pendant cette période à m'impliquer significativement dans l'encadrement de doctorants. J'ai participé à de nombreux congrès où je me suis efforcé de donner de la notoriété aux travaux de notre équipe. J'ai eu aussi une activité significative au d'élus au comité d'entreprise du Cirad, rapporteur de la commission « mobilité géographique » de cette instance.

Cette période a donné lieu à 4 publications en revue à facteur d'impact (RCL9, RCL13, RCL14, RCL22) dont deux publications de doctorants, un chapitre d'ouvrage (CO14) et 11 communications à colloques (CCA5, CCA9, CCA13, CCA14, CCA16, CCA20, CCA21, CCA28, CCA29, CCA30, CC4). J'ai encadré 5 mémoires de niveau master 2 (ME4, ME5, ME16, ME17, ME18), un de niveau Master 1 (ME19) et un de stage de césure de 2<sup>e</sup> année d'ingénieur (ME20). J'ai été impliqué dans l'encadrement de trois thèses de doctorat (DOC3, DOC4, DOC5)

*2011- aujourd'hui: UR SCA / UR AïDA, Montpellier*

A la suite de la modification, par la direction scientifique du Cirad, du périmètre de l'UMR System, j'ai rejoint en 2010 l'UR SCA, devenue UR AïDA (Agroécologie et Intensification Durable des Systèmes de culture Annuels) début 2014. Cette trajectoire non anticipée, mon désaccord profond avec la vision positiviste et réductionniste du directeur de l'unité SCA et ses conséquences en termes de stratégie de recrutement et d'affectation des ressources humaines dans le champ de mon activité, ont sévèrement contraint cette dernière, ralentissant notamment la progression de ma capacité à encadrer des doctorants. J'ai interrompu mon activité d'animateur d'équipe, mais j'ai poursuivi mon implication dans l'enseignement, le développement de mes travaux à portée méthodologique, et le développement de travaux centrés sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture et son adaptation en Afrique au Sud du Sahara, avec notamment le développement d'un portefeuille de projets et de collaborations adaptées à cette ambition. Je me suis ensuite trouvé élu pour 5 ans au Conseil d'Administration du Cirad, comme représentant du personnel. Avec la fin en décembre 2015 de ce mandat, j'ai retrouvé une certaine disponibilité, me conduisant à accepter d'animer à partir de 2016 l'équipe ESCA (Evaluation des Systèmes de Culture Annuels), dont l'effectif est aujourd'hui de 13 cadres scientifiques permanents, avec une croissance prévue à 14 à brève échéance, et un effectif moyen de doctorants autour de 5.

Au cours de cette période, qui se conclut avec le présent mémoire d'HDR, j'ai contribué à 5 publications en revue à comité de lecture (RCL6, RCL15, RCL18, RCL19, RCL21), 11 communications à colloque (CCA3, CCA12, CCA15, CCA22, CCA23, CCA24, CCA25, CCA26, CCA31, CC2, CC3), et 3 chapitres d'ouvrages (CO4/CO5, CO7/CO8, CCO12/CO13, chacun existant en Français et en Anglais). Quatre publications avec des doctorants sont actuellement en révision (PCL1, PCL2, PCL4, PCL5). J'ai encadré 7 mémoires de Master 2 ou spécialité d'ingénieur (ME6, ME7, ME8, ME9, ME10, ME11, ME12) un mémoire de Mastère spécialisé (ME13). J'ai été impliqué dans l'encadrement de 3 thèses



de doctorat aujourd'hui complétées (DOC1, DOC2, DOC6), dont deux (DOC1 et DOC2) comme encadrant principal, et je suis co-encadrant dans 2 thèses de doctorat en cours (DOC7 et DOC8).

## 2. Publications

### 2.1. Vue générale

Au total depuis l'origine de ma carrière, la part de mes activités consacrée à la production de connaissance (de l'ordre de 50% de mon temps en moyenne) a produit 22 articles de revue à facteur d'impact, dont 16 à facteur d'impact supérieur à 1, et parmi ces dernières 6 comme 1<sup>er</sup> auteur et 3 résultant de travaux de doctorants que j'ai encadrés, 31 communications à colloques avec actes et 14 chapitres d'ouvrage. J'ai contribué significativement à l'encadrement de 6 thèses de doctorat, dont 2 comme co-encadrant principal et une comme co-encadrant impliqué pour l'ensemble de la durée de la thèse. J'ai encadré le stage et l'écriture de mémoires de 18 étudiants de niveau Master 2.

Tableau 1: nombre de publication par types

Revue à comité de lecture	Facteur d'impact >1	16	3: Agronomie/Agronomy for Sustainable Development [FI=4.0] 6: Field Crops Research [FI=3.0] 2: Agricultural Systems [FI=2.9] 1: Land Use Policy [FI: 2.7] 1: Agricultural Water Management [FI=2.3] 1: Agronomy Journal [FI=1.4] 2: Experimental Agriculture [FI=1.1]
	Facteur d'impact <=1	6	2: Pesquisa Agropecuaria Brasileira [FI=0.6] 4: Cahiers Agriculture [FI=0.3]
Communications de colloques avec actes		31	
Communications de colloques sans actes		4	
Chapitres d'ouvrages		14	dont 3 traductions de chapitres publiés en deux langues
Mémoires d'étudiants encadrés	Master 2 / spécialité d'ingénieur	18	
Thèses de doctorat encadrées		6	

Dans la liste des publications que l'on trouvera ci-après, les noms soulignés sont ceux d'étudiants, de niveau Master 2 ou de dernière année de cursus d'ingénieur, à l'encadrement desquels j'ai contribué. Si le soulignement est combiné avec des caractères en italique ou en gras, il s'agit de doctorants ou de post-doctorants, respectivement.



## 2.2- Revues à comité de lecture

[RCL1]Affholder, F., 1995. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Res.* 41, 109-121.

[RCL2]Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Res.* 52, 79-93.

[RCL3]Affholder, F., Assad, E.D., Bonnal, P., Macena da Silva, F.A., Forest, F., Madeira Netto, J., Scopel, E., Corbeels, M., 2006. Risques de stress hydrique sur les cultures dans les Cerrados Brésiliens. Du zonage régional à l'analyse des risques à l'échelle des exploitations familiales. *Cah. Agric.* 15, 433-439.

[RCL4]Affholder, F., Jourdain, D., Morize, M., Quang, D.D., Ricome, A., 2008. Eco-intensification dans les montagnes du Vietnam. Contraintes à l'adoption de la culture sur couvertures végétales. *Cah. Agric.* 17, 289-296.

[RCL5]Affholder, F., Jourdain, D., Quang, D.D., Tuong, T.P., Morize, M., Ricome, A., 2010. Constraints to farmers' adoption of direct-seeding mulch-based cropping systems: A farm scale modeling approach applied to the mountainous slopes of Vietnam. *Agric. Syst.* 103, 51-62.

[RCL6]Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, E., Tittone, P., 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Res.* 143, 106-118.

[RCL7]Affholder, F., Rodrigues, G.C., Assad, E.D., 1997. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos Cerrados (Agroclimatic model for evaluation of maize behavior in the cerrado region). *Pesqui. Agropecu. Bras.* 32, 993-1002.

[RCL8]Affholder, F., Scopel, E., Madeira Netto, J., Capillon, A., 2003. Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Agronomie* 23, 305-325.

[RCL9]Affholder, F., Tittone, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agron. J.* 104, 735-748.

[RCL10]Alary, V., Corbeels, M., Affholder, F., Alvarez, S., Soria, A., Xavier, J.H.V., Silva, F.A.M.d., Scopel, E., 2016. Economic assessment of conservation agriculture options in mixed crop-livestock systems in Brazil using farm modelling. *Agric. Syst.* 144, 33-45.

[RCL11]Bainville, S., Affholder, F., Figuié, M., Madeira Netto, J., 2005a. As transformações da agricultura familiar do município de Silvânia : uma pequena revolução agrícola nos Cerrados brasileiros. *Cadernos de Ciência et Tecnologia* 22, 269-291.

[RCL12]Bainville, S., Affholder, F., Figuié, M., Madeira Netto, J., 2005b. Les transformations de l'agriculture familiale de la commune de Silvânia : une petite révolution agricole dans les Cerrados brésiliens. *Cah. Agric.* 14, 103-110.

[RCL13]Baldé, A.B., Scopel, E., Affholder, F., Corbeels, M., Silva, F.A.M.D., Xavier, J.H.V., Wery, J., 2011. Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil. *Field Crops Res.* 124, 240-251.

[RCL14]Giller, K.E., Corbeels, M., Nyamangara, J., Triomphe, B., Affholder, F., Scopel, E., Tittonell, P., 2011. A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. *Field Crops Res.* 124, 468-472.

[RCL15]Hauswirth, D., Pham, T.S., Wery, J., Tittonell, P., Jourdain, D., Affholder, F., 2015. Apports des typologies d'exploitations aux démarches de conception en agriculture de conservation : une étude de cas dans le nord du Vietnam. *Cah. Agric.* 24, 102-112.

[RCL16]Jourdain, D., Boere, E., van den Berg, M., Dang, Q.D., Cu, T.P., Affholder, F., Pandey, S., 2014. Water for forests to restore environmental services and alleviate poverty in Vietnam: A farm modeling approach to analyze alternative PES programs. *Land Use Policy* 41, 423-437.

[RCL17]Macena Da Silva, F.A., Silveira Pinto, H., Scopel, E., Corbeels, M., Affholder, F., 2006. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto et soja utilizadas em plantio direto. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 717-724.

[RCL18]Quyen, L.N., Affholder, F., Montagne, J., Jourdain, D., Ripoché, A., Capillon, A., 2015. Sowing windows for a spring crop introduced in rice cultivation areas affected by low temperature and radiation. *Exp. Agric.* 51, 540-566.

[RCL19]Ripoché, A., Crétenet, M., Corbeels, M., Affholder, F., Naudin, K., Sissoko, F., Douzet, J.M., Tittonell, P., 2015. Cotton as an entry point for soil fertility maintenance and food crop productivity in savannah agroecosystems—Evidence from a long-term experiment in southern Mali. *Field Crops Res.* 177, 37-48.

[RCL20]Scopel, E., Macena da Silva, F.A., Corbeels, M., Affholder, F., Maraux, F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie* 24, 383-395.

[RCL21]Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Macena da Silva, F.A., Corbeels, M., Xavier, J.H.V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., Mendes, I.d.C., Tourdonnet, S.D., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 113-130.

[RCL22]Sissoko, F., Affholder, F., Autfray, P., Wery, J., Rapidel, B., 2013. Wet years and farmers' practices may offset the benefits of residue retention on runoff and yield in cotton fields in the Sudan–Sahelian zone. *Agric. Water Manage.* 119, 89-99.

### 2.3- Projets soumis dans revues à comité de lecture

[PCL1]Hauswirth, D., Sen, P.T., Jourdain, D., Affholder, F., Wery, J., Tittonell, P., Submitted. Land conversion to Conservation Agriculture in Vietnamese highlands: short-term impact on productivity and profitability at field scale. *Exp. Agric.*

[PCL2]Kouakou, P., Muller, B., Affholder, F., Guissé, A., Sultan, B., submitted. Did cereal yield increase during the past 20 years in Sudano-Sahelian West Africa? A case study of yield gaps of Pearl Millet in Senegal using a model and data from farmers' fields. *Field Crops Res.*

[PCL3]**Ricome, A.**, Affholder, F., Gérard, F., Muller, B., Poyedebat, C., Quirion, P., Sall, M., submitted. Are subsidies to weather-index insurance the best use of public funds? A bio-economic farm model applied to the Senegalese groundnut basin. *Agric. Syst.*

[PCL4]**Bruelle, G.**, Affholder, F., Abrell, T., Ripoche, A., Dusserre, J., Naudin, K., Tiftonell, P., Rabeharisoa, L., Scopel, E., Submitted. Can conservation agriculture improve crop water availability in an erratic tropical climate producing water stress? A simple model applied to upland rice in Madagascar. *Agric. Water Manage.*

[PCL5] **Ranaivoson, L.**, Naudin, K., Ripoche, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., Corbeels, M., submitted. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. *Agron. Sustain. Dev.*

## 2.4 Communications de colloques avec actes

[CCA1]Affholder, F., 1993. Quelques outils et méthodes d'analyse des risques climatiques. Contribution au zonage., Analyse de la diversité des situations agricoles. Actes de l'atelier d'échanges et de formation, 22-28 octobre 1993. Cirad Montpellier, France, Garoua, Cameroun., pp. 27-29.

[CCA2]Affholder, F., Bonnal, P., Jourdain, D., Scopel, E., 1998. Small-scale farming diversity and bioeconomic environment variability: a modelling approach. In: AFSRE (Ed.), 15th international symposium of the association for farming systems research and extension. Rural Livelihoods, empowerment and the environment. Going beyond the farm boundary., Pretoria, South Africa, pp. 952-959.

[CCA3]Affholder, F., Jourdain, D., Alary, V., Quang, D.D., Corbeels, M., 2012. Models for assessing farm-level constraints and opportunities for conservation agriculture: relevance and limits of the method, identified from two case studies. In: Hauswirth, D., Pham, T.S., Nicetic, O., Tivet, F., Le Quoc, D., Van de Fliert, E., Kirchhof, G., Boulakia, S., Chabiersky, S., Husson, O., Chabanne, A., Boyer, J., Autfray, P., Lienhard, P., Legoupil, J.C., Stevens, M.L. (Eds.), *Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods. Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes.- Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia.* Cirad, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Vietnam; University of Queensland, Brisbane, Australia., Hanoi, Vietnam, pp. 164-165.

[CCA4]Affholder, F., Jourdain, D., Scopel, E., 2007. Bio-economic modeling: lessons learned on obstacles towards interdisciplinarity. In: Donatelli, M., Hatfield, J., Rizzoli, A. (Eds.), *Farming Systems Design 2007. Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems.*, Catania (Italy), pp. 91-92.

[CCA5]Affholder, F., Jourdain, D., Scopel, E., Alary, V., 2010. Bioeconomic modelling: is there room for seamless interdisciplinarity? In: Coudel Emilie, D.H.S.C.H.B. (Ed.), *International symposium ISDA 2010. Innovation et sustainable development in agriculture and food : Abstracts and papers ( Cd-Rom.* Cirad, Montpellier, p. 11 p.

[CCA6]Affholder, F., **Macena da Silva, F.A.**, 1997. Estudo exploratorio das interações entre risco climático e técnicas de manejo das culturas na região dos cerrados, usando o modelo Sarra., *Agrometeorologia, Monitoramento Ambiental e Agricultura Sustentável.* X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, July 13-18, 1997, Piracicaba, SP, Brazil, pp. 366-368.

[CCA7]Affholder, F., **Macena Da Silva, F.A.**, 1998. Variabilité spatiale de l'interaction entre gestion de la fertilité et risque climatique., *Congrès Mondial des Sciences du Sol.* 16, 1998/08/20-26., AISS, AFES, Cirad., Montpellier, France., pp. 1-6.

[CCA8]Affholder, F., Madeira Neto, J., Scopel, E., 2004. Yield gap assessment and diagnosis in Brazil using a crop model., New directions for a diverse planet: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 Sep – 1 Oct 2004.

[CCA9]Affholder, F., Madeira Neto, J., Scopel, E., Wery, J., 2010. Closing the yield gap under uncertain weather: risk analysis of cropping system intensification in family agriculture of the tropics. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A.S. (Eds.), Agro2010, XIth ESA congress. Agropolis International, Montpellier, pp. 341-342.

[CCA10]Affholder, F., Reyniers, F.N., Scopel, E., 1994. L'eau et l'activité agricole: diagnostic et modélisation du fonctionnement de quelques hydrosystèmes agricoles tropicaux., Recherches-systèmes en agriculture pour le développement rural./ Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development. International Symposium. Cirad-SAR, Montpellier, France, pp. 411-419.

[CCA11]Affholder, F., Rodrigues, G., 1995. Adaptação para os cerrados de um modelo simples de análise das potencialidades climáticas do milho. In: Adversidades climáticas e a produção agrícola., Anais do IX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campina Grande-PB 24 a 28 de julho de 1995.pp 263-265.

[CCA12]Affholder, F., Sultan, B., Kouakou, P.K., Poeydebat, C., Muller, B., 2015. Yield Gap and the shares of climate and crop management in yield and yield variability of staple crops in West Africa. O-3330b-01. Our Common Future under Climate Change. CFCC15, FRA, pp. 596-597.

[CCA13]Alary, V., Affholder, F., Scopel, E., Alvarez, S., Soria, A., De Oliveira, M.N., Xavier, J.H.V., Corbeels, M., 2010. Economic assessment of conservation agriculture options for family farms in Brasil with a farm household model. 1st Latin American and European Congress on Co-Innovation of Sustainable Rural Livelihood Systems, Minas, Uruguay, April 27th to 30th, 2010.

[CCA14]Alary, V., Affholder, F., Scopel, E., Valadares, J.H., Corbeels, M., 2010. Multi-criteria evaluation of cropping systems: multi attribute hierarchies and linear programming methods. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A.S. (Eds.), Agro2010, XIth ESA congress. Agropolis International, Montpellier, pp. 389-390.

[CCA15]Armas-Herrera, C., Beaudoin, N., Restovich, Andriulo, Affholder, F., Maltas, A., Olesen, Sharif, Laurent, Cohan, Mary, B., 2016. Modeling with Stics the effects of no-tillage vs. tillage in cropping systems under contrasting pedoclimatic conditions. In: Ewert, F., Boote, K.J., Rötter, R.P., Thorburn, P., Nendel, C. (Eds.), IcropM2016. Crop modelling for agriculture and food security under global change. International Crop Modelling Symposium, Berlin.

[CCA16]Balde, A.B., Scopel, E., Affholder, F., Wery, J., 2010. Relay intercropping maize (Zea mais) with two different cover crops in a no-tillage system in Central Brazil: maize grain yield and total biomass production. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A.S. (Eds.), Agro2010, XIth ESA congress. Agropolis International, Montpellier, pp. 287-288.

[CCA17]Corbeels, M., Affholder, F., Scopel, E., Jourdain, D., Macena Da Silva, F.A., 2007. Mulch and cover crops based cropping systems. Do they fit into small scale farms of the tropics ? In: Donatelli, M., Hatfield, J., Rizzoli, A. (Eds.), Farming Systems Design 2007. Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems., Catania (Italy), pp. 19-20.

[CCA18]Corbeels, M., Macena da Silva, F.A., Affholder, F., Scopel, E., 2004. Modelling a millet cover crop and subsequent maize production in the tropical Cerrados of Brazil., European Agriculture in a Global Context. 8th ESA Congress, 10-15 july 2004, Copenhagen, Denmark, pp. 975-976.

[CCA19]Corbeels, M., Macena, F., Affholder, F., Scopel, E., 2003. simulating effects of crop residue mulching on soil water and maize grain yield in the tropical cerrados of brazil. 2nd World Congress on Conservation Agriculture, Foz do Iguaçu, Brazil.

[CCA20]Corbeels, M., Triomphe, B., Titttonell, P., Affholder, F., Lahmar, R., Scopel, E., Alary, V., Jourdain, D., 2010. Tailoring conservation agriculture to local contexts and conditions of smallholder farmers in Africa. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A.S. (Eds.), Agro2010, XIth ESA congress. Agropolis International, Montpellier, pp. 37-38.

[CCA21]Dang Dinh, Q., Jourdain, D., Affholder, F., Ricome, A., Morize, M., To Phuc, T., 2010. Direct seeding in mulch cropping systems. Do they fit into farms of the mountainous area of Vietnam? In: Vietnam, H. (Ed.), International Symposium Sustainable Land Use and Rural Development in Mountainous Regions of Southeast Asia, 21-23.

[CCA22]Gérard, F., Affholder, F., Ricome, A., Poeydebat, C., Muller, B., Sall, M., Quirion, P., 2015. Policies to favour crop intensification and farm income under climatic risk in West Africa. P-3330-32. Our Common Future under Climate Change. CFCC15, FRA, pp. 608-608.

[CCA23]Hauswirth, D., Kong, R., Gramont, F., Jourdain, D., Affholder, F., Quang, D.D., Wery, J., Titttonell, P., 2012. Assessing agricultural sustainability of current farming systems to guide alternative management strategies: a case study in the highlands of Vietnam. In: Hauswirth, D., Pham, T.S., Nicetic, O., Tivet, F., Le Quoc, D., Van de Fliert, E., Kirchhof, G., Boulakia, S., Chabiersky, S., Husson, O., Chabanne, A., Boyer, J., Autfray, P., Lienhard, P., Legoupil, J.C., Stevens, M.L. (Eds.), Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods. Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes.- Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia. Cirad, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Vietnam; University of Queensland, Brisbane, Australia., Hanoi, Vietnam, pp. 132-137.

[CCA24]Jourdain, D., Boere, E., van den Berg, M., Quang, D.D., Thanh, C.P., Affholder, F., 2012. Can more irrigation help in restoring environmental services provided by upper catchments ? A case study in the northern mountains of Vietnam. In: Hauswirth, D., Pham, T.S., Nicetic, O., Tivet, F., Le Quoc, D., Van de Fliert, E., Kirchhof, G., Boulakia, S., Chabiersky, S., Husson, O., Chabanne, A., Boyer, J., Autfray, P., Lienhard, P., Legoupil, J.C., Stevens, M.L. (Eds.), Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods. Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes.- Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia. Cirad, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Vietnam; University of Queensland, Brisbane, Australia., Hanoi, Vietnam, pp. 161-163.

[CCA25]Kouakou, P.K., Muller, B., Affholder, F., Guisse, A., Sultan, B., 2015. Pearl millet yields and climate evolution across the last 20 years in central Senegal. A yield gap study. P93. Climate-Smart Agriculture 2015 : Global Science Conference. 3, FRA, pp. 194-194.

[CCA26]Macena Da Silva, F.-A., Affholder, F., Corbeels, M., 2015. Future climate change impacts on maize production in the Cerrado of Brazil. P78. Climate-Smart Agriculture 2015 : Global Science Conference. 3, FRA, pp. 161-161.

[CCA27]Macena, F., Corbeels, M., Scopel, E., Affholder, F., Pinto, H.S., 2003. Characterising effects of surface residues on evaporation for a simple water balance model., 2nd World Congress on Conservation Agriculture, Foz do Iguaçu, Brazil, pp. 522-524.

[CCA28]**Motisi, N., Maltas, A.**, Affholder, F., Sierra, J., Scopel, E., Corbeels, M., 2010. Modelling nitrogen dynamics and maize crop productivity in direct seeding mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrados using the STICS soil-crop model. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A.S. (Eds.), Agro2010, XIth ESA congress. Agropolis International, Montpellier, pp. 273-274.

[CCA29]Scopel, E., Flandin, M.A., Xavie, r.J.H.V., Corbeels, M., da Silva Macena, F.A., Affholder, F., Angevin, F., De Tourdonnet, S., David, C., 2010. Multi-criteria evaluation of direct seeding mulch based cropping systems (DMC) in the context of small scale farmers in the Cerrado region of Brazil. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A.S. (Eds.), Agro2010, XIth ESA congress. Agropolis International, Montpellier, pp. 413-414.

[CCA30]Scopel, E., Maltas, A., Corbeels, M., Macena Da Silva, F.A., Affholder, F., Douzet, J.M., Oliver, R., Cardoso, A., 2008. Dynamique et valorisation de l'azote dans les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) des Cerrados Brésiliens. Séminaire International Les sols tropicaux en semis-direct sous couvertures végétales. Terre malgache, 2007-12-03/2007-12-08 Antananarivo, Madagascar, pp. 57-60.

[CCA31] Affholder, F., Jourdain, D., Corbeels, M., Alary, V., Naudin, K., Bonnal, P., Scopel, E., Gerard, F., Quirion, P., Belhouchette, H., 2015. Is « bio-economic » farm modelling of any help for farming system design ? In: Gritti, E.S., Wery, J. (Eds.), Proceedings of the 5th International Symposium for Farming Systems Design., Montpellier, France.

## 2.5.- Communication à colloques sans actes

[CC1]Maraux, F., Affholder, F., Forest, F., Ganry, F., N'Diaye, M., Oliver, R., Scopel, E., 1997. Some Cirad activities and perspectives in water and nutrient management in arid and semi-arid regions using nuclear techniques. Meeting on Management of Nutrients and Water in Rainfed Arid and Semi-Arid Areas for Increasing Crop Production. IAEA, Vienne, Autriche, pp. 47-50.

[CC2]Muller, B., Sall, M., Leblois, A., Balde, A., Fall, M., Kouakou, P., Affholder, F., 2012. L'assurance agricole indiciaire en Afrique de l'ouest : principes, premières réalisations et perspectives. In: CORAF, WE CARD. (Eds.), West and Central Africa Agricultural Science Week (3rd WCA-ASW). Ndjamen, Tchad., p. 3.

[CC3]**Ricome, A.**, Affholder, F., Gerard, F., Quirion, P., 2012. An agro-economic model to study farm adaptation to climate change and climate variability. 4th International AMMA Conference, July 2-6, Toulouse, France.

[CC4]Scopel, E., Affholder, F., Corbeels, M., Wery, J., Triomphe, B., Jourdain, D., Sabourin, E., 2007a. Co-construction de systèmes de culture innovants pour une production durable en agriculture familiale : processus de conception-évaluation., Journée Intensification Ecologique, Cirad, août 2007, Montpellier.

## 2.6- Chapitres d'ouvrage

[CO1]Affholder, F., 1994. Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique. In: Reyniers, F.N., Netoyo, L. (Eds.),



Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture ? (Actes Sem. Int., Bamako, Mali, December 1991). J.Libbey, Paris, pp. 191-203.

[CO2]Affholder, F., 1996. Couplage de modèles biophysiques et socioéconomiques: quelques questions posées par un agronome. In: Reyniers, F.N., Benoit-Cattin, M. (Eds.), Couplage de modèles en agriculture. Colloques, Cirad, Montpellier, pp. 22-27.

[CO3]Affholder, F., Bonnal, P., Scopel, E., 1996. Analyse des interactions entre risques climatiques et risques économiques dans les choix techniques des agriculteurs. In: Reyniers, F.N., Benoit-Cattin, M. (Eds.), Couplage de modèles en agriculture. Colloques, Cirad, Montpellier, pp. 101-108.

[CO4]Affholder, F., Feintrenie, L., Losch, B., 2014a. Contribuer à nourrir le monde et à faire vivre les territoires. In: Sourisseau, J.-M. (Ed.), Agricultures familiales et mondes à venir. Ed. Quae, Versailles, pp. 93-95.

[CO5]Affholder, F., Feintrenie, L., Losch, B., 2015a. Helping to feed the world and territories to live. In: Sourisseau, J.-M. (Ed.), Family farming and the Worlds to come. Springer [Pays-Bas], Dordrecht, pp. 91-93.

[CO6]Affholder, F., Forest, F., Lidon, B., Valony, M.J., 2002. La gestion de l'eau. Memento de l'Agronome. Cirad, GRET, Ministère des Affaires Etrangères, Paris, pp. 643-662.

[CO7]Affholder, F., Parrot, L., Jagoret, P., 2014b. Acquis et perspectives de l'intensification écologique. In: Sourisseau, J.M. (Ed.), Agricultures familiales et mondes à venir. Quae, Versailles, France, pp. 303-316.

[CO8]Affholder, F., Parrot, L., Jagoret, P., 2015b. Lessons and Perspectives of Ecological Intensification. In: Sourisseau, J.M. (Ed.), Family Farming and the Worlds to Come. Springer, Quae, pp. 301-312.

[CO9]Affholder, F., Scopel, E., 2001. Apports de la modélisation des cultures pour le diagnostic agronomique régional: application au cas du maïs chez les petits producteurs des Cerrados brésiliens. In: Malézieux, E., Trébuil, G., Jaeger, M. (Eds.), Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. Cirad, Montpellier, pp. 107-125.

[CO10]Bonnal, P., Affholder, F., Jourdain, D., Scopel, E., 2001. Un modèle bioéconomique pour l'analyse du risque. In : Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. - Montpellier : Cirad, 2001, pp. p. 329-349.

[CO11]Feintrenie, L., Affholder, F., 2014. Contribuer aux systèmes écologiques et sociaux. In: Sourisseau, J.-M. (Ed.), Agricultures familiales et mondes à venir. Ed. Quae, Versailles, pp. 97-110.

Feintrenie, L., Affholder, F., 2015. Contributing to Social and Ecological Systems. In: Sourisseau, J.M. (Ed.), Family Farming and the Worlds to Come. Springer, Quae, pp. 95-109.

[CO12]Gérardeaux, E., Affholder, F., Bernoux, M., Muller, B., 2015. Les relations entre systèmes de culture annuels tropicaux et changement climatique. In: Torquebiau, E. (Ed.), Changement climatique et agricultures du monde. Ed. Quae, Versailles, pp. 107-120.

[CO13]Gérardeaux, E., Affholder, F., Bernoux, M., Muller, B., 2016. Relationships between tropical annual cropping systems and climate change. In: Torquebiau Emmanuel, M.D.C.P. (Ed.), Climate change and agriculture worldwide. Springer, Heidelberg, Allemagne, pp. 109-124.

[CO14]Scopel, E., Affholder, F., 2010. Production durable en agriculture familiale du Sud : conception de systèmes de culture innovants. In: Berry, D., De Raïssac, M., Guérin, H. (Eds.), *Inventer une nouvelle agriculture*. Cirad, Montpellier, p. 2 p.

## 2.7-Mémoires académiques.

[MA1] Affholder, F., 1986. Suivi multilocal de l'enracinement du sorgho au Mali, conséquence sur la réserve utile racinaire. M.Sc. et Diplôme d'Agronomie Approfondie (Ingénieur Agronome), Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier, 83p.

[MA2] Affholder, F., Figuié, M., 1989. La jachère améliorée : une voie d'association de l'agriculture et de l'élevage dans le Hamahamet. Diplôme d'Ingénieur en Agronomie Tropicale, Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes, Montpellier, France, 127p.

[MA3] Affholder, F., 2001. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Thèse de Doctorat en Agronomie, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Ecole Doctorale ABIES, Paris, 246p.

## 3. Encadrements de travaux d'étudiants

### 3.1.- Mémoires de master 2 et spécialité d'ingénieur encadrés.

[ME1] Cousy, C., 1995, « Modélisation du Bilan Hydrique par WinSIAM. Cas des cultures de Maïs au Brésil ». Mémoire 3<sup>e</sup> année Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan.

[ME2] Jonis, M., 1996. Contribution à l'explication de la variabilité des rendements du maïs pluvial chez les petits producteurs du centre-ouest Brésilien. M.Sc. et Diplôme d'Agronomie Approfondie., Montpellier Supagro, Montpellier, 45p

[ME3] Douai, C., 1997. Contribution à l'explication de la variabilité des rendements de maïs dans une petite région agricole du Brésil. M.Sc. et Diplôme d'Agronomie Approfondie. Montpellier Supagro, Montpellier, 43p.

[ME4] Montagne, J., 2008. Contraintes pour l'enchaînement de deux cycles de riz irrigué par an dans les zones de montagne du Nord du Vietnam. M.Sc Biologie Geosciences Agroressources et Environnement, Spécialité Ecologie Fonctionnelle et Développement Durable, Parcours "Fonctionnement des écosystèmes naturels et cultivés, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 26p.

[ME5] Kambi, K., 2009. Conséquences des pratiques agricoles sur la fertilité des sols. Discussion sur les alternatives aux engrais chimiques dans les plateaux de Dimadju et Mbéradju au Nord de la Grande Comore. Conception et Evaluation des Systèmes de Production Agricole, M. Sc., Montpellier Supagro, Montpellier, 66p.

[ME6] Bertrand, G., 2011. Variabilité du rendement du riz pluvial dans les essais agronomiques de la matrice SCRiD à Vakinankaratra : analyse de l'interaction eau - pratiques culturales par voie de modélisation. Agronomie et Agroalimentaire, Systèmes et techniques innovants pour un Développement Agricole Durable, parcours "Conception et Evaluation des Systèmes de Production Agricole", M.Sc., Montpellier Supagro, Montpellier, 37p.

[ME7] Poeydebat, C., 2012. Estimations de la marge d'intensification de la production de céréales en agriculture familiale des régions tropicales. M.Sc. Biologie Geosciences Agroressources et Environnement, Spécialité Ecologie Fonctionnelle et Développement Durable, Parcours "Fonctionnement des écosystèmes aquatiques et terrestres naturels et anthropisés", Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 29p.

[ME8] Abrell, T., 2013. Etude du risque climatique en riz pluvial et de ses interactions avec les systèmes de culture dans la région du Lac Alaotra (Madagascar). Mémoire préparé pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage, Agrocampus Ouest, Rennes, Angers, 35p.

[ME9] Rakotobe, V., 2014. Modélisation de l'effet des techniques anti-ruissellement sur les rendements du sorgho et leur variabilité inter-annuelle sous climat semi-aride du Burkina Faso. M.Sc. Production Végétale Durable et Diplôme d'ingénieur Agronome, Montpellier Supagro, Montpellier, 36p.

[ME10] Lechevallier, E., 2015. Cropping system sensitivity to climate change in the northern uplands of Lao PDR. An agroclimatic modeling approach. M.Sc. Agronomie; Production Végétale Durable, et diplôme d'Ingénieur Agronome, Montpellier Supagro, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, Montpellier, 66p.

[ME11] Garcia, L., 2015. Impact du changement climatique sur les rendements du mil et de l'arachide au Sénégal. Approche par expérimentation virtuelle. M.Sc. Agronomie; Production Végétale Durable, et diplôme d'Ingénieur Agronome, Montpellier Supagro, Montpellier, 69p

[ME12] Traore, A., 2015. Analyse de l'évolution à long terme de l'écart de rendement du sorgho dans une rotation coton-sorgho-arachide plus ou moins intensifiée. Approche par modélisation. M.Sc. Agronomie et Agroalimentaire, Systèmes et techniques innovants pour un Développement Agricole Durable, parcours "Conception et Evaluation des Systèmes de Production Agricole", Montpellier Supagro, Montpellier, 47p.

### **3.2- Mémoires d'étudiants de niveau Master 2 co-encadrés (études interdisciplinaires)**

*Avec Françoise Gérard, économie, UR GREEN, Cirad :*

[ME13] Armel Kouabenan, 2015, Analyse de la la pauvreté et de l'insécurité alimentaire. Etude de cas de Yilou, Burkina Faso. Mémoire présenté pour l'obtention du Mastère Spécialisé : Innovations et Politiques pour une Alimentation Durable (IPAD). Institut des Régions Chaudes, Montpellier Supagro, Montpellier, 91p.

*Avec Damien Jourdain, économie, UMR G-EAU, Cirad*

[ME14] Morize, M., 2005. Etude des conditions technico-économique d'adoption de SCV par les exploitations agricoles d'une zone de montagne au nord-Vietnam. Analyse des contraintes à l'échelle des exploitations et construction d'un modèle en programmation linéaire. Mémoire de diplôme d'ingénieur en agronomie tropicale, Centre National d'Etudes Agronomiques en Régions Chaudes (CNEARC). Montpellier, 169p

[ME15] Ricôme, A., 2006. Etude des possibilités d'adoption de techniques alternatives à la défriche-brûlis dans les exploitations agricoles d'une commune au Nord-Ouest du Vietnam. Mémoire d'ingénieur Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan, Toulouse, 97p

*Avec Veronique Alary, économie, UR SELMET, Cirad*

[ME16] Alvarez, S., 2007. Intérêt de l'introduction des systèmes de culture sous couvert végétal (SCV): approche par la modélisation économique pour les exploitations issues de la réforme agraire dans les Cerrados, Brésil. Production Végétale Durable, Mémoire de M.Sc et de Diplôme d'ingénieur Agronome, Montpellier Supagro, Montpellier, 93p.

[ME17] Soria, A., 2008. Intérêt économique de l'adoption des systèmes de couverture végétale chez les petits producteurs des Cerrados brésiliens. Biologie Geosciences Agroressources et Environnement, Parcours "Elevage dans les Pays du Sud: Environnement et Développement", M.Sc., Université des Sciences et Technologies du Languedoc, Montpellier, 90p.

*Avec Hatem Belhouchette, agronomie, UMR SYSTEM, IAMM*

[ME18] Ahmed, Z., 2012. Futurs possibles des systèmes de production dans les exploitations familiales issues de la réforme agraire à Unai-MG, Brésil. Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. M.Sc, Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes, Montpellier, 143p.

### **3.3- Tutorat de rédaction de mémoires d'étudiants Master 1 ou 2<sup>e</sup> année de cursus d'ingénieur**

[ME19] Remal, S., 2008. Farm characterization and analysis of crop residues management in two Mozambican villages: Ruaca and Gorogonsa. Mémoire de stage de 2<sup>e</sup> année Montpellier Supagro (encadré par M. Corbeels et L. Ruzinamhodzi, Cirad, CIAT, TSBF)

[ME20] Iglesia, J., 2010. Contribution à l'évaluation et la conception de systèmes de culture adaptés aux contraintes agro-climatiques des hautes vallées du Vietnam. Supagro, Montpellier, p. 28.

### **3.4- Travaux de doctorat encadrés comme co-encadrant principal**

[DOC1] Luu Ngoc Quyen, 2012. Introduction d'une culture de printemps dans les systèmes de culture des "terres irrigables" des montagnes du Nord du Vietnam. Approche par modèle agroclimatique. These de doctorat, Agronomie, Supagro, ED SIBAGHE (Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement), Montpellier, France, 152p.

[DOC2] Hauswirth, D. 2013. Evaluation agro-économique ex-ante de systèmes de culture en agriculture familiale : le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (Nord Vietnam). These de doctorat, Agronomie, Supagro, ED SIBAGHE (Ecole Doctorale Systèmes

intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement), Montpellier, France, 150p.

### **3.5- Travaux de doctorat encadrés comme co-encadrant secondaire**

[DOC3] Sissoko, Fagaye, 2009. Analyse des flux d'eau dans les systèmes de culture sous couverture végétale en zone soudano-sahélienne: cas du coton semé après une culture de sorgho/brachiaria au sud du Mali. These de doctorat, Agronomie, Supagro, ED SIBAGHE (Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement), Montpellier, 163 pp.

[DOC4] Balde, Alpha Bocar, 2011. Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en relais sous semis direct en zone tropicale subhumide. These de doctorat, Agronomie, Supagro, ED SIBAGHE (Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement), Montpellier, France, 164 pp.

### **3.6- Travaux de doctorat ayant fait l'objet d'un encadrement spécifique de ma part sur un chapitre de thèse**

[DOC5] Maltas, A., 2007. Analyse par experimentation et modelisation de la dynamique de l'azote dans les systèmes sous semis direct avec couverture végétale des Cerrados Bresiliens. Sciences du Sol, Agronomie. SupAgro, Montpellier, p. 219.

[DOC6] Bruelle, Guillaume, 2014. Pertinence de l'agriculture de conservation pour tamponner les aleas climatiques. Cas des systèmes de culture en riz pluvial au Lac Alaotra, Madagascar. These de doctorat en co-tutelle, sciences agronomiques, université d'Antananarive, Montpellier Supagro, SIBAGHE, Montpellier, 110p.

### **3.7- Travaux de thèse en cours**

[DOC7] Lalaina Ranaivoson, inscrite en co-tutelle à l'ED A2E -Université d'Antananarivo (Madagascar) et l'ED GAÏA –SupAgroMontpellier (France). Soutenance prévue fin 2017. Intitulé : Compromis dans l'utilisation des biomasses végétales en agriculture de conservation –Relation entre quantités conservées et performances des fonctions agroécologiques du mulch. Directeur de thèse : Marc Corbeels, encadrant principal : Krishna Naudin

[DOC8] Adama Tounkara, inscrit à l'université de Thiès, Sénégal. Soutenance prévue fin 2018. Intitulé : Diagnostic agronomique et Modélisation de l'efficacité d'utilisation des nutriments dans les systèmes de culture du Mil au Sénégal% ? Directeurs de thèse : D. Masse et S. Ndiaye ; encadrante principale : C. Clermont-Dauphin.

## 4. Financement de mes activités

A l'exception de mon premier poste, au Sénégal, pour lequel je disposais de moyens de travail réunis par les responsables de mon unité de rattachement, j'ai, à chacune des grandes étapes de ma carrière, construit ou contribué significativement à la construction du réseau de collaborations appropriées à la poursuite de mon fil conducteur de chercheur, et à la mobilisation des moyens financiers nécessaires.

Les principaux projets qui ont ainsi servi de support à mes activités ont ainsi été les suivants :

Au Brésil, j'ai élaboré sous la supervision de F.N. Reyniers et E.D. Assad, mes responsables respectifs du Cirad et de l'EMBRAPA, le projet « Connaissance et Gestion des Hydrosystèmes Agricoles des Cerrados », soumis avec succès au financement compétitif interne de l'EMBRAPA, pour un montant de 400 000 Euros pour 5 ans. J'ai obtenu également un soutien du Ministère français des affaires étrangères pour un montant de 50 000 Euros cumulés sur 5 ans. J'ai dirigé la rédaction d'une ATP Cirad (Action Thématique Prioritaire) intitulée « Analyse des interactions entre risques climatiques et risques économiques dans les choix techniques des agriculteurs ». J'ai défendu avec succès cette ATP devant la commission d'arbitrage, pour un montant de 100 000 Euros pour 4 ans. Cette ATP a soutenu non seulement une partie de mes activités au Brésil, mais également des activités menées par notre équipe, et notamment E. Scopel, au Mexique en collaboration avec l'INIFAB et le CIMMYT, ainsi que des échanges entre les deux terrains.

J'ai coordonné les activités financées par ces deux projets.

A la fin de ma période d'affectation au Brésil, j'ai également contribué à l'élaboration d'un nouveau projet soumis par l'EMBRAPA à la Banque Mondiale (fonds « PRODETAB »), projet qui a été accepté pour un montant de 200 000 USD pour trois ans et a garanti à l'équipe brésilienne des moyens de poursuivre, après mon départ les travaux que nous avions engagés.

Au Vietnam, j'ai construit un projet baptisé « Scientific Basis for Improving the Sustainability of Cropping systems in the Mountainous Region of Northern Vietnam » et convaincu l'IRRI de prendre en charge ses coûts opérationnels (40 000 USD /an pour 3 ans de fonctionnement +20 000 USD d'équipements scientifiques en deux ans + véhicules, mobilier et ordinateurs mis à disposition), en contrepartie de quoi j'étais mis à disposition de l'IRRI par le Cirad pour trois ans comme coordonnateur du projet. Avec le responsable du programme « Unfavourable Environments » de l'IRRI, j'ai contribué à la rédaction puis à la négociation, notamment auprès du Ministère Français des Affaires Etrangères, d'un projet baptisé « Rice Landscape Management », pour un montant de 900 000 USD pour 4 ans, dans le cadre du « Challenge Program Water and Food » du CGIAR. J'ai également obtenu un appui de l'ambassade de France au Vietnam, sous la forme d'un poste de volontaire international pendant 3 ans, correspondant à un montant total de 70.000 USD.

Après ces affectations de longue durée à l'étranger, mes activités de montage de projets et de recherche de fonds ont été plus modestes, dans la mesure où j'ai été invité à participer à des projets me fournissant les moyens de poursuivre mes travaux : l'ATP Cirad « MEDUSA » (2006-2008), le projet ANR-PEPITES (2009-2012), et le Projet UE « ABACO » (2010-2014). Ces projets finançaient des

missions, des stages de master et des activités de terrain au Vietnam, Mali, Burkina Faso, à Madagascar et au Brésil.

J'ai contribué à l'écriture, puis à l'exécution et à la coordination d'un sous-projet d'un projet ANR, baptisé ESCAPE (montant du « workpackage concerné : 360 000 Euros, pour 4 ans) coordonné par B. Sultan (IRD, UMR LOCEAN)

Enfin j'ai été invité à contribuer à un projet financé par le NERC (National Education and Research Council) et le DFID (Department For International Development) britanniques, le projet « AMMA2050 » (African Monsoon Multidisciplinary Analysis), le montant du budget alloué aux activités sous ma responsabilité étant de 190 000 Euros pour 4 ans.

## 5. Activités d'enseignement et de formation

Depuis 2008, Supagro et le Cirad m'ont conjointement confié une mission d'enseignant-consultant, pour un total de 50h à 30h d'équivalent-TD selon les années. Il s'agit d'une contribution à la réflexion stratégique sur les formations d'ingénieur et de master en agronomie tropicale et méditerranéenne, la réalisation d'enseignements dans ces formations portées par les départements MPRS et IRC de Supagro, contribuer au développement de l'offre en formation sur la modélisation dans le cadre de l'école doctorale ainsi qu'à destination de chercheurs travaillant dans les pays du Sud, et coordonner l'implication de collègues du Cirad dans les enseignements de Supagro-MPRS et dans l'encadrement de stages de M1 et M2 correspondants.

Je délivre depuis cette date en moyenne chaque année un total de 9 h de cours à l'attention des étudiants de 2<sup>e</sup> année de Supagro (3h), du master spécialisé Supagro « Innovation et Politiques pour une Alimentation Durable (3h), et d'une classe regroupant des étudiants de 3<sup>e</sup> année du cursus d'ingénieur de Supagro ; spécialité « Production Végétale Durable », avec des étudiants du master 2 Biologie Geosciences Agroressources et Environnement, Spécialité Ecologie Fonctionnelle et Développement Durable, suivant un parcours « Fonctionnement des écosystèmes aquatiques et terrestres naturels et anthropisés ».

J'encadre le travail d'un groupe de 3 à 5 étudiants de 3<sup>e</sup> année du cursus d'ingénieur de Supagro, spécialité « production végétale durable », pour un travail dirigé d'ingénierie agroécologique.

J'ai encadré trois années de suite des étudiants de première année de Supagro pour un travail dirigé portant sur l'analyse de controverses scientifiques.

J'ai développé un module de formation à la modélisation *ad-hoc* en agronomie du système de culture, à l'attention des doctorants et chercheurs. Ce module d'une semaine a été délivré deux fois auprès d'une vingtaine d'étudiants d'Afrique de l'Ouest dans le cadre d'une coopération avec l'ISRA – CERAS au Sénégal. Il est maintenant inscrit au catalogue des formations du Cirad ouvertes à l'extérieur de l'entreprise.



## 6. Réseau de collaborations

Figurent dans le tableau ci-après les co-auteurs de publications auxquelles je suis associé à ce jour, répartis entre grands types de disciplines et par institutions de rattachement à la date de la publication. Les étudiants de master n'ont pas été mentionnés, ni les collègues avec lesquels je n'ai eu personnellement aucun échange direct au cours du travail dont ils sont co-auteurs. En italique les doctorants, et en gras les collègues ayant été premier auteur d'un article en revue à comité de lecture dont je suis co-auteur. Au total j'ai collaboré directement à des publications avec 45 biophysiciens dont 20 en dehors du Cirad (desquels 12 sont des collègues d'institutions de recherche des pays du sud) et 16 chercheurs en sciences sociales dont 7 sont extérieurs au Cirad.

Tableau 2: Collaborations directes, par institution

Institution	Agronomie et sciences de l'environnement	Economie, systèmes de decision et de production	Mathématiques appliqués
Cirad	Patrice Autfray <b>Alpha Balde</b> Alain Capillon Marc Corbeels Michel Cretenet Jean-Marie Douzet Edward Gerardeaux Patrick Jagoret Rabah Lahmar Bruno Lidon Florent Maraoux Francis Forest <b>Damien Hauswirth</b> <i>Patrice Kouakou</i> Alexandra Maltas Bertrand Muller Krishna Naudin <b>Luu Ngoc Quyen</b> Bruno Rapidel François Noël Reyniers <sup>(+)</sup> <b>Aude Ripoché</b> Natacha Motisi <b>Eric Scopel</b> Pablo Titonell Philippe Tixier (Ecologie)	<b>Véronique Alary</b> Philippe Bonnal <sup>(+)</sup> Laurene Feintrenie Muriel Figuié (Sociologie) Françoise Gérard <b>Damien Jourdain</b> Bruno Losch Laurent Parrot Bernard Triomphe	
ISRA (Sénégal)	Alpha Balde Madiagne Diagne <sup>(+)</sup>	Moussa Sall	
EMBRAPA (Brésil)	Eduardo Assad (télédétection, climatologie) José Madeira Netto (Sc. du sol) <b>Fernando Antonio Macena da Silva</b> G. Rodrigues (Ecophysiologie)	Jose Humberto V. Xavier (systèmes de production)	
IER (Mali)	<b>Fagaye Sissoko</b> Amadou Traore		
VASI (Vietnam)	<b>Luu Ngoc Quyen</b> T.S. Pham P.T. Sen	Dang Dinh Quang (Systèmes de production, systèmes agraires)	
IRRI (Centre International CGRAI, Philippines)	To Phuc Tuong	Sushil Pandey	
INRA (France)	Nicolas Beaudoin Nadine Brisson <sup>(+)</sup> Bruno Mary		Sébastien Roux
Supagro (France)	Jacques Wery Stephane de Tourdonnet	<b>Sébastien Bainville</b>	
IAMM(Centre International IAM, Montpellier)		Hatem Belhouchette	
WUR (Pays Bas)	<b>Ken Giller</b>	E. Boere	
IRD (France)	Benjamin Sultan (Climatologie) Martial Bernoux (science du sol)		
CNRS (France)		Philippe Quirion	

(+) collègues décédés

## **Partie B**

### **Bilan des travaux**



## **1. Cadre général : quelle marge de manœuvre technique des producteurs pour l'intensification écologique en fonction de l'environnement biophysique et économique des exploitations**

Les systèmes de production aujourd'hui dominants dans les pays développés sont en grande partie hérités d'une révolution agricole et qui s'est déroulée au XX<sup>e</sup> siècle dans l'ensemble de ces pays, avec des mécanismes variés. Cette « deuxième révolution des temps modernes » a permis de multiplier par un facteur allant jusqu'à 100 la productivité du travail agricole, avec à la fois une croissance très forte de la surface cultivée par actif, mais aussi une augmentation considérable des rendements des cultures, avec un facteur multiplicatif pouvant atteindre 10, par rapport aux rendements antérieurs (Mazoyer and Roudart, 1997). Cette révolution a pris le nom de « révolution verte » lorsqu'elle s'est prolongée dans un certain nombre de pays moins développés, un peu plus tard dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et avec le plus souvent une augmentation moindre de la surface agricole par actif. Dans les deux cas la très forte augmentation des rendements agricoles a reposé sur un couplage entre l'évolution du matériel génétique rendu disponible pour les agriculteurs, et une certaine artificialisation de l'écosystème exploité visant à éliminer le plus possible les risques de stress nutritionnels et hydriques pour les espèces mobilisées pour produire. Cette artificialisation elle-même a été permise d'une part par la très haute densité énergétique des hydrocarbures fossiles, mobilisés pour permettre l'apport exogène en grande quantité des ressources susceptibles d'être limitantes dans l'écosystème localement exploité, et d'autre part par les progrès de la chimie organique mobilisée dans l'élaboration des pesticides et herbicides réduisant la biodiversité et ainsi, à court terme, les compétitions entre les espèces mobilisées pour produire et les autres êtres vivants. Il s'est agi d'une intensification agricole définie par l'augmentation de l'usage, par unité de surface, des facteurs de production, en vue de d'augmenter la valeur de la production par unité de surface (Boserup, 2005; Tiffen and Mortimore, 1994). Cette forme d'intensification agricole peut être qualifiée de « conventionnelle », pour signifier qu'il s'est agi du processus d'intensification agricole le plus courant à l'échelle globale depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Les systèmes de production qu'on observe, en ce début du XXI<sup>e</sup> siècle comme résultante de cette intensification agricole conventionnelle, quant à eux, ne devraient peut être pas recevoir ce qualificatif car ils sont loin de représenter les systèmes les plus fréquemment observés sur la planète. En effet, dans bien des régions du monde, et tout particulièrement en Afrique au sud du Sahara, la révolution agricole du XX<sup>e</sup> siècle n'a pas eu lieu ou n'a concerné qu'une minorité d'agriculteurs (Evenson and Golin, 2003; Griffon, 1995; Losch, 2014; Mazoyer and Roudart, 1997).

Or l'intensification agricole conventionnelle a conduit à des systèmes agricoles ayant de forts impacts négatifs sur l'environnement, et dont la durabilité n'est ainsi pas assurée. En effet l'artificialisation de l'écosystème a perturbé de nombreux services écosystémiques, dont tout particulièrement les services de régulation, depuis l'échelle du champ cultivé jusqu'à l'ensemble de la biosphère (Matson et al., 1997; Vitousek et al., 1997). Et par ailleurs, à l'horizon des deux ou trois prochaines générations au moins, l'humanité va devoir augmenter de 30 à 110 % sa production agricole pour assurer une alimentation adéquate à sa population en croissance, selon les sources et les scénarios de distribution sociale et géographique des aliments produits et disponibles, de réduction des gaspillages alimentaires et de maîtrise de la place de la viande, dont la production au-delà de certains

seuils est excessivement consommatrice de ressources, dans les régimes alimentaires. Cette augmentation de la production devra donc se conjuguer avec une réduction des impacts environnementaux négatifs de l'agriculture, pour aboutir à un système agricole et alimentaire global durable au plan économique, social et environnemental (Alexandratos and Bruinsma., 2012; Cassman, 1999; Collomb, 1999; FAO, 2003; FAO, 2006; Keating et al., 2014; Koning and van Ittersum, 2009; Paillard et al., 2010; Tilman et al., 2011).

Ce défi de concilier objectif de production et préservation de l'environnement a été presque simultanément synthétisé dans le concept de révolution doublement verte (Conway, 1997; Conway and Griffon, 1994) et dans celui d'intensification écologique (Cassman, 1999). La plupart des auteurs maniant ces concepts mettent en avant un principe supposé en donner la clé : la mobilisation des processus de l'écosystème qui soutiennent et régulent la production primaire (Affholder et al., 2008; Bommarco et al., 2013; Bonny, 2011; Breman and Sissoko, 1998; Chevassus au Louis and Griffon, 2008; Doré et al., 2011; Egger, 1987; Hochman et al., 2013). Une « agriculture écologiquement intensive », serait ainsi une agriculture reposant sur une mobilisation intense de processus écologiques pour produire, et avec « l'intensification écologique », on se propose d'augmenter la production en conservant un rôle majeur à ces processus. Avec cette nuance, et notamment si on admet qu'une agriculture peut être écologiquement intensive sans que les rendements soient nécessairement très élevés, on constate que les agricultures les moins intégrées au marché, telles qu'on les rencontre dans nombre de régions tropicales, sont pratiquement par définition des agricultures écologiquement intensives, puisque, n'accédant pas aux intrants industriels, leur production dépend exclusivement de processus écologiques. Et pourtant elles produisent souvent très peu par unité de surface ou par travailleur, quand on les compare à celles à qui le marché permet un usage intensif de ressource exogènes à l'écosystème cultivé qu'elles exploitent directement (Mazoyer, 2001). Dans l'application du concept d'intensification écologique à cette agriculture-là, l'objectif d'intensification concerne bien la production par unité de surface, tandis qu'il concerne moins la contribution des fonctions de l'écosystème, dont on voudrait plutôt *maintenir* le caractère intensif.

Plus généralement le défi d'une agriculture durable, même si c'est bien un défi global, ne se présente pas tout à fait de la même manière partout. Les exploitations familiales des régions tropicales sont placées dans des conditions très variées certes, mais le plus souvent très différentes de celles des pays industrialisés, non seulement du point de vue de leur environnement biologique et physique, mais aussi de celui de leur « environnement économique et social », c'est-à-dire le système de prix et des services financiers (crédit, assurance) à sa porte (résultant des prix du marché et des coûts d'accès à ce marché) et les institutions et conventions qui les relient entre elles et au reste de la société, et finalement du point de vue du revenu qu'elles tirent de leur activité (Sourisseau, 2014). Ce revenu est, pour près de 450 millions d'actifs agricoles des pays tropicaux, faible au point que l'objectif de leur activité s'apparente souvent à celui de la simple survie à très court terme des membres de leurs familles, représentant environ 1 milliard 250 millions de ruraux (Mazoyer, 2001).

Le présupposé fondateur de mon travail est ainsi assez classique : il est que les familles rurales des pays du sud sont pour la plupart pauvres parce que cet environnement économique et social des exploitations qui les font vivre ne permet pas de rémunérer efficacement leur travail de production agricole, et non pas parce qu'elles ignoreraient des techniques de production plus efficaces que celles qu'elles pratiquent, ou n'auraient pas les compétences pour les mettre en œuvre. Un corollaire

est que lorsque ces familles surexploitent les ressources naturelles au point de compromettre la durabilité de leur mode d'exploitation, c'est non pas par ignorance des enjeux environnementaux, c'est parce qu'elles n'ont pas d'autres alternatives pour leur survie, avant la migration, voire la conquête plus ou moins violente d'un nouvel espace.

Dans cette hypothèse, sans changement de cet environnement économique ni invention de technologies nouvelles, et à moins de possibilités de migration économiquement efficace pour une partie au moins des membres de ces familles, celles-ci sont dans un piège de pauvreté. En effet, la production qu'elles peuvent tirer de la terre dont elles disposent finira un jour ou l'autre par être insuffisante pour assurer leur subsistance, à cause de la croissance démographique, tandis que la production par unité de surface ne peut que diminuer sous l'effet de l'épuisement des ressources du milieu.

S'il existe en grand nombre des exploitations effectivement placées dans ce « piège à pauvreté », un objectif possible pour la recherche agronomique appliquée à ce type de situation, est de concevoir, pour un environnement économique pas nécessairement plus favorable, des systèmes de production fondés sur des technologies innovantes les rendant plus efficaces que les systèmes de production actuellement mis en œuvre, avec l'espoir que ces innovations suffisent à sortir de cette impasse. L'idée est alors que l'innovation permette d'initier un cercle devenu vertueux, où un surplus de production permet à l'exploitation d'accumuler des ressources, et donc de se capitaliser, jusqu'à disposer de moyens nouveaux de produire avec une efficacité encore accrue. La plus grande part des forces de la recherche agronomique tropicale est orientée depuis plus d'un demi siècle vers cet objectif, en passant notamment par la conception de variétés et de systèmes de culture et d'élevage « adaptés à ce type d'exploitations », et, dans la variante contemporaine de ce projet, éventuellement co-construits avec les agriculteurs.

Mon travail vise un objectif sensiblement différent et complémentaire, celui d'identifier les changements de l'environnement économique de ces exploitations qui rendraient possible leur sortie de l'impasse et leur ouvriraient des perspectives de capitalisation en mobilisant des technologies existantes. De très nombreuses caractéristiques de l'agriculture des pays industrialisés, et parmi ces caractéristiques, celle majeure du revenu des agriculteurs, sont aujourd'hui très fortement dépendantes de la façon dont une part de la richesse produite par les sociétés auxquelles elles appartiennent est utilisée pour modifier et même piloter leur environnement économique par l'investissement dans les infrastructures, la régulation des prix, les taxes et les subventions. Pourquoi devrait-il en être autrement « au sud » ? Sur quels aspects de cet environnement agir ? Avec quels coûts et bénéfices attendus ?

Si la place de l'agronomie du système de culture paraît assez naturelle dans le projet de concevoir des systèmes de culture innovants, elle est moins évidente dans le projet d'agir sur l'environnement économique des exploitations. Pourtant, les rapports entre les bénéfices et les coûts d'une politique de soutien au développement de l'agriculture par l'intensification écologique, dépendent des performances agronomiques et environnementales comparées des systèmes de culture actuellement employés et des systèmes qu'on souhaite promouvoir. C'est ainsi que le travail dont je présente le bilan dans ce qui suit est une évaluation quantitative de ces performances à l'échelle des systèmes des cultures (section 2), articulées avec les sciences sociales au moyen notamment de modèles bioéconomiques d'exploitation (section 3) et une contribution méthodologique à ce type particulier



d'évaluation intégrée, multi-critère et multi-échelle des systèmes de culture (section 4). Mon travail s'est concentré sur un type particulier d'exploitations agricoles, les exploitations familiales de polyculture-élevage à dominante de céréales pluviales dans les systèmes de culture, en Asie, Afrique et Amérique Latine. Ces exploitations représentent une population de près d'un milliard de personnes au sein de laquelle l'incidence de l'extrême pauvreté est particulièrement élevée (Dixon et al., 2001; Hyman et al., 2008).

## **2. Evaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture existants et des « prototypes de l'intensification écologique »**

Le rendement et la plupart des variables d'intérêt agronomique et environnemental des systèmes de cultures sont fortement variables dans le temps et l'espace, en raison de la variabilité selon ces deux dimensions, de toutes les variables impliquées dans le déterminisme du fonctionnement de l'écosystème cultivé : variables climatiques, variables physiques, chimiques et biologiques du sol, variables biologiques de l'environnement aérien des cultures. La gestion technique des cultures, elle-même variable dans le temps et l'espace, modifie plus ou moins et de manière plus ou moins coûteuse en travail ou en intrants ces variables de l'environnement biophysique des cultures. Etre capable d'établir des liens quantifiés entre le revenu des producteurs et les techniques qu'ils mettent en œuvre, ainsi que les quantités produites et les ressources mobilisées pour les obtenir, suppose de quantifier la dépendance des variables d'intérêt agro-environnementales aux autres variables de l'environnement, c'est-à-dire de modéliser de manière quantitative le fonctionnement de l'écosystème cultivé. Il n'existe pas et il n'existera sans doute jamais de modèle universel de l'écosystème cultivé, simplement parce qu'il existe une quasi infinité de variables et de liens entre variables impliquées dans le fonctionnement du système (Sinclair and Seligman, 1996). Mais toutes les variables de l'écosystème n'ont pas le même poids dans le déterminisme des performances agronomiques et environnementales des cultures, et la hiérarchie entre variables est elle-même très dépendante de la localité étudiée et de l'échelle à laquelle elle est étudiée. C'est ce qui a d'ailleurs justifié le développement des méthodes de diagnostic agronomique régional (Dore et al., 2008; Leterme et al., 1994; Sebillotte et al., 1978; van Ittersum et al., 2013). Le diagnostic agronomique (ou « yield gap analysis ») vise en effet à établir la liste des principales variables impliquées dans les variations de rendement entre parcelles, à l'intérieur d'une petite région agricole, c'est-à-dire pour un système agraire donné, et pour quelques années d'observations dans ces parcelles. Cette approche se fonde sur le concept de rendement potentiel, défini pour un cultivar donné dans une parcelle donnée, par le rendement théorique qui serait obtenu si seuls le rayonnement et la température étaient déterminants, tous les autres facteurs possible de variation des rendements étant fixés à un niveau non limitant. En étudiant les variations de différence entre les rendements réels et les rendements potentiels, plutôt que directement les variations de rendement réel, on se concentre sur la part de variations qui est susceptible de dépendre au moins en partie de la gestion technique de la culture, tandis que le rendement potentiel est défini pour ne dépendre, autant que possible, que de facteurs entièrement imposés par la nature aux exploitants (Fig.1). Dans le cas de l'agriculture pluviale, on considère plutôt comme référence le rendement limité par l'eau, c'est-à-dire le rendement potentiel précédent, affecté en outre de l'effet limitant de la pluviométrie (van Ittersum et al., 2013).

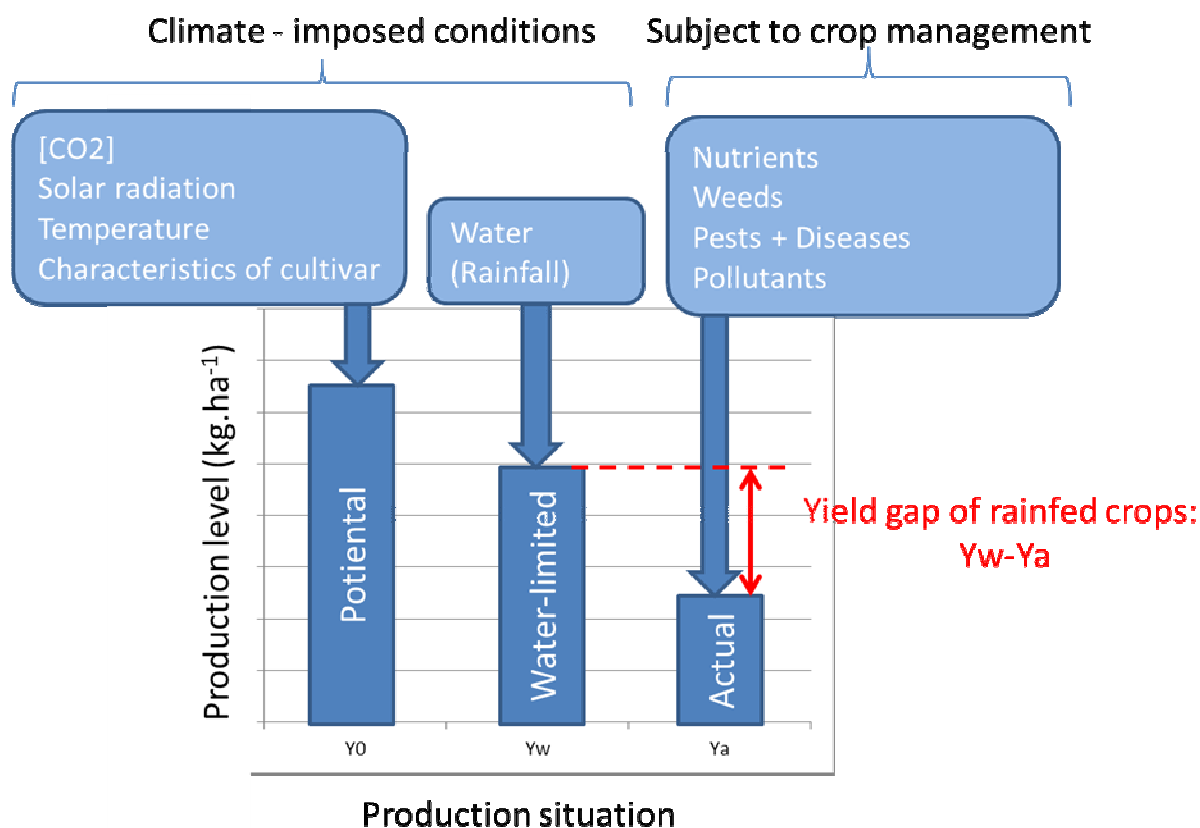


Figure 1. Concept du « Yield Gap ». Adapté de v. Ittersum et al. (2013).

Une partie significative de mes travaux a consisté à évaluer les écarts entre rendements réels et potentiels en agriculture familiale plus ou moins intégrée au marché dans les pays tropicaux, à identifier les causes de ces écarts, et à modéliser les interactions entre système de culture et environnement les plus déterminantes dans les variations des performances agronomiques dans ces agricultures. J'ai construit pour cela des dispositifs combinant :

- des réseaux de « situations culturelles » en parcelles d'agriculteurs. Une situation culturelle est définie par l'unité spatiale la plus grande à laquelle on puisse appliquer l'hypothèse d'homogénéité du milieu et des actes techniques appliqués à la gestion de ce milieu par l'agriculteur (Jouve, 1984) et se matérialise sous forme de placettes de 10 à 50 m<sup>2</sup> dans mes dispositifs. Ces placettes font l'objet d'observations régulières pendant 2 à 3 ans, portant sur les actes de gestion technique, les états du sol, le développement et la croissance des cultures, la pression d'adventices, les dégâts causés par les ravageurs, et les composantes du rendement;
- des situations expérimentales, en station de recherche et en parcelles d'agriculteurs, contrastées du point de vue des ressources hydriques et minérales disponibles pour la culture, faisant l'objet d'observations de même type que dans les réseaux précédents mais avec une plus forte intensité de mesure.

J'ai mobilisé des modèles de culture, le plus souvent en apportant des modifications spécifiques (mais parfois nombreuses) à des modèles existants, et après les avoir calés et évalués en utilisant au mieux les données des dispositifs précédents, pour deux types d'objectifs : calcul des rendements

potentiels auxquels comparer les rendements des producteurs, ou extrapolation des performances des systèmes de culture pratiqués par les producteurs ou envisagés comme alternatives écologiquement intensives, pour des conditions pédo-climatiques différentes de celles observées dans les réseaux de parcelles de producteurs pendant les quelques années où ils étaient maintenus.

Ces travaux ont été l'occasion de mon implication dans l'encadrement de 11 mémoires de master ou de spécialisation d'ingénieur agronomes, dont 5 centrés sur la conduite d'un diagnostic agronomique avec l'emploi d'un modèle simple d'estimation des rendements potentiels (ME2, ME3, ME6, ME7, ME12). Ce type de travail est particulièrement formateur dans la mesure où il permet aux étudiants de prendre conscience de la multitude d'interactions à l'œuvre dans l'écosystème cultivé, et de démythifier la modélisation en convaincant de la puissance d'une modélisation raisonnée pour démêler la complexité de ces interactions. Cependant, les calendriers des stages et surtout des dates de soutenance des étudiants de master ou de spécialité d'ingénieur contraignent fortement les possibilités proposer ce type de travaux aux étudiants. En effet, seules les zones tropicales de l'hémisphère Sud permettent de concilier une présence de l'étudiant(e) sur le terrain pendant une partie significative du cycle cultural, avec l'accès aux données des composantes du rendement du même cycle. Or relever le défi du diagnostic agronomique, pour la 1<sup>ère</sup> fois dans sa carrière, me paraît nécessiter une certaine motivation et une certaine confiance dans les données, toutes deux sans doute difficile à acquérir si on n'a pas contribué soi-même à la collecte des données et si on ne s'est pas rendu compte par soi-même de la diversité des environnements et des états du couvert végétal dans le réseau de situations culturelles à analyser. D'autres travaux d'étudiants avaient pour objet des travaux modestes de modélisation à partir de données expérimentales, puis une application du modèle pour analyser l'impact, sur la variabilité interannuelle des rendements, de changements techniques (ME1, ME4, ME8), éventuellement croisés avec le changement climatique (ME9, ME10, ME11).

C'est aussi sur ce volet de mes activités que se situent tous les travaux de doctorat à l'encadrement desquels j'ai contribué (DOC1 à DOC6). Dans tous ces travaux, l'équipe encadrante à laquelle j'appartenais souhaitait conduire le doctorant à soutenir sa thèse dans les trois ans avec à cette date plusieurs publications acceptées ou avec des avis d'évaluateurs anonymes rendant probable leur acceptation dans un délai de quelques mois, dans des revues à comité de lecture avec un facteur d'impact supérieur à un, la thèse étant basée sur un dispositif expérimental conduit au moins en partie par le doctorant lui-même dans un environnement tropical et dans le cadre d'un partenariat avec une institution de recherche du Sud, et dont l'interprétation ferait appel au moins en partie à de la modélisation dynamique des systèmes de culture. Ces objectifs me paraissent aujourd'hui à la fois cohérents avec l'objectif de former de jeunes scientifiques à une agronomie systémique quantitative orientée vers les agricultures des pays en voie de développement, mais trop ambitieux dans un délai de trois ans, à moins de disposer de dispositifs expérimentaux à peu près pérennes, suivis par des équipes techniques bien rodées, de manière à pouvoir accueillir des doctorants successifs avec un engagement relativement modeste dans la logistique de leur fonctionnement. Pour les années à venir, ma priorité, avant de me réengager dans l'encadrement de nouvelles thèses « au sud » en agronomie, sera de contribuer à établir de tels dispositifs avec nos partenaires.

## Résultats

*Quantification des écarts entre rendements réels et potentiels :*

CCA12, 2015; CCA25, 2015; **RCL6, 2013**; CCA9, 2010; CCA8, 2004 ; **RCL8, 2003**; CO9, 2001; MA3, 2001; CO1, 1994; CCA10, 1994.

Tout d'abord, la comparaison entre les rendements potentiels, limités par l'eau, et réels de chaque région montre qu'en moyenne, le climat n'est pas ce qui limite le plus le rendement en grain des céréales (maïs, mil, ou riz pluvial) dans ces agricultures, pas même pour le climat semi-aride d'Afrique soudano-sahélienne. Cette faible dépendance des rendements réels au climat est telle que le rendement réel moyen du riz pluvial des montagnes du Vietnam sous 700 à 2300mm de pluviométrie annuelle est très proche de celui du mil au Sénégal sous 200 à 600mm de pluviométrie annuelle, soit de l'ordre d'une tonne de grains par ha. Les rendements réels moyens sont compris en 27 et 56% des rendements limités par l'eau selon les cas que j'ai étudiés

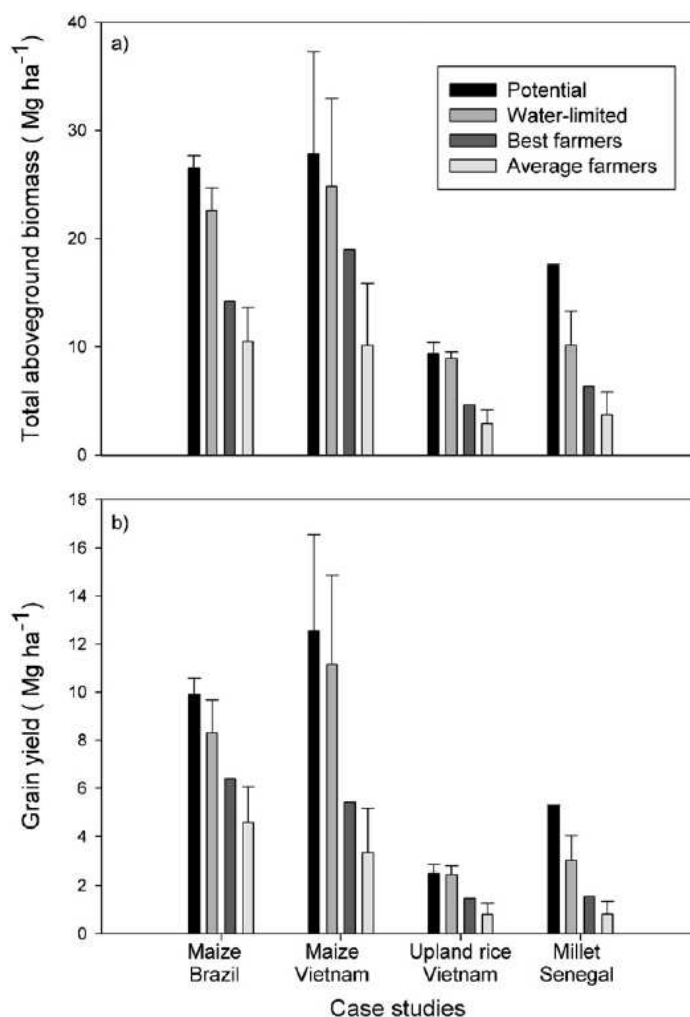


Figure 2. « Yield Gap » de 4 études de cas en agriculture familiale des tropiques, pour a) la biomasse totale et b) le rendement en grains. « Best farmers' yield » - meilleur rendement des agriculteurs, correspond au 90<sup>e</sup> percentile des rendements observés dans les parcelles de producteurs. La barre d'erreur (non applicable au meilleur rendement des agriculteurs) est l'écart type des données. Rendements potentiels et limités par l'eau simulés à l'aide du modèle PYE (Potential Yield Estimator). Les autres données de rendement proviennent de mes dispositifs de suivis de situations

culturelles en réseau de parcelles de producteurs mis en place sur chacun de mes terrains d'affectation au cours de ma carrière (Extrait de [RCL6], 2013).

*Cause de ces écarts*

**RCL6, 2013**; CCA8, 2004; **RCL8, 2003**; CO9, 2001; MA3, 2001; CO1, 1994; CCA10, 1994

Les causes prédominantes de ces écarts importants sont les contraintes de disponibilité des nutriments, dont tout particulièrement l'azote, la compétition avec les adventices pour l'eau et les nutriments et des densités de peuplement faibles. Ces faibles densités sont un facteur aggravant de la pression des adventices dont l'accès à la lumière est ainsi favorisé, mais peuvent résulter d'une stratégie délibérée d'établir un peuplement végétal de faible densité dans un contexte de faibles ressources en eau ou en nutriments. Dans un des cas étudiés, toutefois, les faibles densités de peuplement étaient clairement le résultat de la mauvaise efficacité des pratiques de mises en culture, dans un contexte d'apprentissage, par les producteurs, d'itinéraires techniques moto-mécanisés en remplacement d'itinéraires manuels ou en traction animale, et avec une gestion collective des tracteurs et semoirs qui elle-même faisait l'objet de tâtonnements de la part des associations de producteurs qui avaient acquis ces équipements. Les faibles ressources en nutriments sont quant à elles la résultante de la faiblesse des apports fertilisants organiques et minéraux. Dans aucun des cas étudiés les bio-agresseurs autres que les adventices ne représentaient une contrainte telle que leur impact soit détectable dans les variations observées des rendements.

C'est dans le cas des agricultures les moins intégrées au marché, étudiées notamment au Sénégal et dans certaines régions reculées du Vietnam, que les écarts au potentiel sont plus importants, et surtout que le potentiel de production de grain est lui-même le plus faible car les cultivars utilisés ont des indices de récolte très bas. Cela correspond à un objectif de production de biomasse utilisable comme combustible, fourrage, ou matériau de construction, au moins aussi important que l'objectif de production de grains, dans ces types d'agriculture. Il existe donc dans ces types d'agriculture un potentiel extrêmement important de croissance de la production de grains de céréales, via une augmentation du rendement, et ce potentiel peut être exploité par l'augmentation de l'indice de récolte des cultivars utilisés, l'augmentation de la fertilité des sols et de la densité de peuplement, et la maîtrise des adventices. Dans les deux cas de forte intégration au marché, étudiés au Vietnam et au Brésil, le rendement relatif est comparativement plus élevé que dans les cas précédents, et c'est essentiellement grâce à des techniques d'intensification conventionnelle: indice de récolte et densité de semis plus élevés, et recours systématique aux engrais minéraux, voire aux herbicides.

*Variabilité interannuelles des rendements et de leurs écarts au potentiel*

CCA15, 2016; **RCL18, 2015**; CO12, 2015; CCA12, 2015; CCA25, 2015 ; CCA26, 2015; **RCL21, 2013**; **RCL22, 2013**; CCA23, 2012; **RCL14, 2011**; **RCL13, 2011**; CCA9, 2010; CCA16, 2010; CCA28, 2010; CCA29, 2010; CCA30, 2008; **RCL17, 2006**; **RCL3, 2006**; CCA18, 2004; **RCL20, 2004**; CCA27, 2003; CCA19, 2003; CO6, 2002; MA3, 2001; CCA7, 1998; CCA6, 1997; **RCL7, 1997**; **RCL2, 1997**; CCA11, 1995 ; **RCL1, 1995**; CCA10, 1994 ; CCA1, 1993.

Lorsque l'on s'intéresse non plus aux rendements moyens mais plutôt à leurs variations entre parcelles et entre années, ce qui frappe c'est la remarquable stabilité des rendements réels, notamment dans les systèmes agraires les moins intégrés au marché, par rapport aux variations interannuelles ou spatiales du rendement limité par l'eau. Le recours à la modélisation m'a permis de mieux analyser la variabilité interannuelle des rendements pour différents types de systèmes de

culture plus ou moins intensifs, en simulant leurs performances agronomiques pour un climat représenté par plus d'une dizaine d'années de données météorologiques, avec des modèles calés sur leurs performances observées sous un espace plus réduit de variations des conditions climatiques.

Plus le système de culture permet d'atteindre des rendements élevés les années où la contrainte hydrique est faible, plus les écarts entre rendements peuvent être grands d'une année à une autre (Fig.3). C'est donc surtout le « yield gap », ou plus généralement l'écart de rendement entre systèmes intensifs et extensifs, qui peut être extrêmement variable selon les années à cause de la contrainte hydrique. Lorsque cette variabilité augmente, augmente le nombre d'années telles que l'efficacité des ressources mobilisées pour l'intensification est inférieure à une certaine valeur. Cela se produit tout particulièrement lorsque les techniques de culture conduisent à augmenter l'évapotranspiration potentielle et réelle de la culture, en augmentant notamment son indice de surface foliaire, sans augmenter la quantité d'eau accessible aux racines.

Il y a donc un enjeu à concevoir des systèmes de culture à la fois intensifs et aussi peu risqués que possible (satisfaisant donc à certains des critères de l'intensification écologique et qualifiables de « climato intelligents » ou appartenant à la « climate-smart agriculture »). Il est en tout cas indispensable, lorsque l'on traite la question des systèmes de culture susceptibles de réduire le yield gap des cultures annuelles en agriculture familiale des tropiques, d'évaluer les performances des systèmes de culture non pas seulement en termes de rendements moyens, mais en tenant compte de leur variabilité interannuelle.

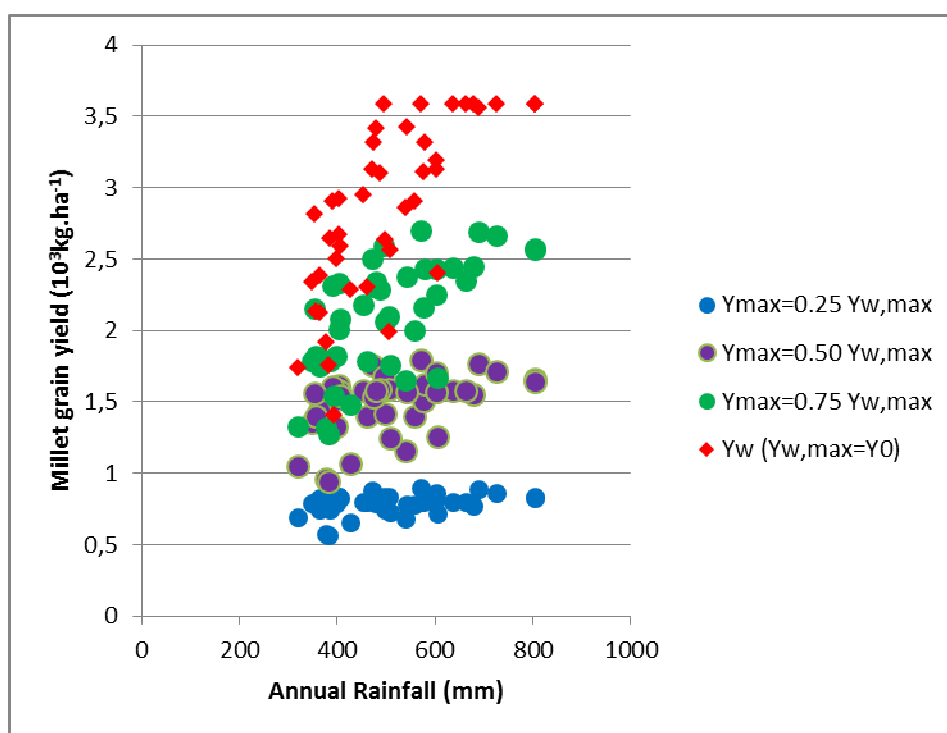


Figure 3. Variabilité inter-annuelle des pluies et du rendement simulé d'un mil plus ou moins intensifié au Sénégal. Rendements simulés d'un mil pour 40 années de données climatiques de la station de Bambey, en fonction du cumul pluviométrique annuel de chacune de ces années. Le mil est supposé conduit de manière plus ou moins intensive suivant 4 modalités telles que le rendement maximum atteint, les années où la pluviométrie n'est pas limitante, est égal à 25%, 50%, 75%, ou 100% du rendement potentiel  $Y_0$ , lui-même égal à la valeur maximale du rendement limité par l'eau  $Y_w$ ,

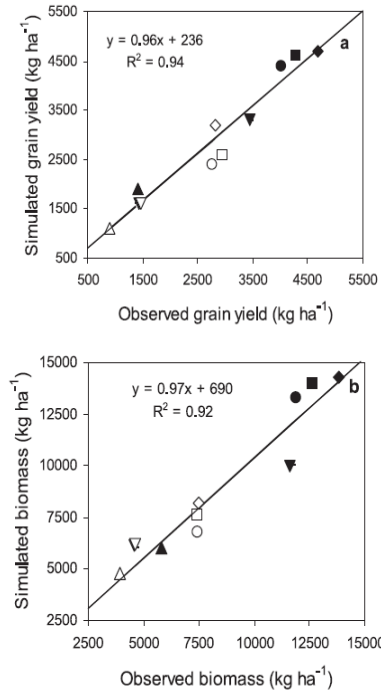
( $Y_{w, \max}$ ) atteinte pour les années où la pluviométrie n'est pas limitante. Extrait de la présentation orale correspondant à CCA12, conférence « Our Common Future Under Climate Change », Paris, Unesco, juillet 2015.

Il est évidemment indispensable également de considérer les impacts environnementaux de ces systèmes, dans la mesure où d'une part leur productivité à long terme, mais aussi l'adhésion de la société à des politiques agricoles visant à la réduction de ce yield gap, dépendent toutes deux de ces impacts environnementaux. L'intensification écologique a été précisément définie comme l'objectif de réduire les yield gaps en maintenant aussi faibles que possible les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement (voir par ex. Cassman, 1999). Pour les grands types d'agro-écosystèmes concernés par mes travaux, l'agriculture de conservation constitue une voie privilégiée d'intensification écologique.

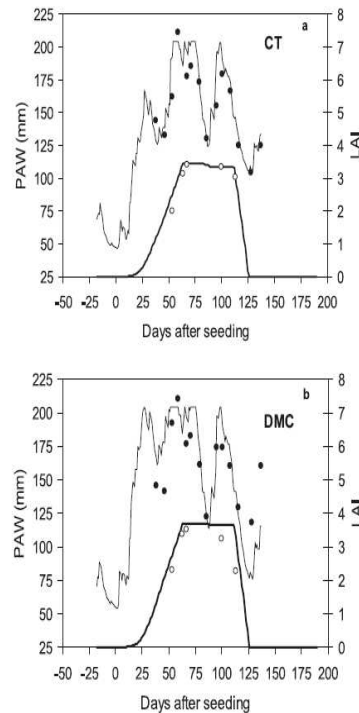
C'est ainsi qu'un certain nombre de mes travaux avait pour objectif l'évaluation des performances agro-environnementales, avec leur variabilité interannuelle, des systèmes de culture existants et de prototypes de systèmes plus intensifs, dont des systèmes appartenant à l'agriculture de conservation, sous différents types de climat, dans le cas des cultures annuelles strictement pluviales et de plein champ. Il m'est arrivé d'aborder le cas de climats de montagne de la zone tropicale où la température et le rayonnement contribuent de manière significative à la variabilité des performances agronomiques des cultures, mais je me suis plus généralement intéressé aux climats tropicaux allant du semi-aride au subhumide, dans lesquels c'est la variabilité des précipitations qui est le déterminant majeur de la part due au climat de la variabilité inter-annuelle des rendements.

Dans CO6 (2002), j'ai contribué à une synthèse, s'adressant à un public assez large, sur les variables du système de culture dont la manipulation influence la variabilité interannuelle des rendements dans les climats tropicaux. Il s'agit du choix du matériel végétal (durée du cycle, dynamique du LAI et du système racinaire, sensibilité aux contraintes hydriques), de la date de semis, de la densité de peuplement, de la fertilisation, de la gestion de l'état de surface du sol pour limiter évaporation et ruissellement (notamment via les paillis), et de la gestion des adventices ou des espèces en association. La réserve utile racinaire du sol peut être augmentée lorsque des contraintes chimiques ou mécaniques s'exercent sur la croissance des racines, tandis que la capacité de stockage en eau du sol lui-même est assez peu sensible aux manipulations par le système de culture et influence peu l'intensité des stress hydriques ou leur distribution temporelle.

Plus spécifiquement, dans le registre de la production de connaissances nouvelles, j'ai contribué à la modélisation des effets de l'agriculture de conservation sur le bilan hydrique (Fig.4), et à l'utilisation de ces modèles pour estimer l'impact de l'agriculture de conservation sur les distributions interannuelles de rendements sous diverses hypothèses de climat, de sols, et de modalités techniques considérées.



**Figure 5.** Simulated versus observed values for (a) grain yield and (b) total above-ground biomass of maize grown during the 1995 (white symbols) and 1996 (black symbols) growing seasons in the La Tinaja site. The five points per growing season represent the five treatments (▽ ▼ CT, △ ▲ DMC0, ○ ● DMC1.5, □ ■ DMC3 and ◇ ♦ DMC4.5) of the experiment (see text).

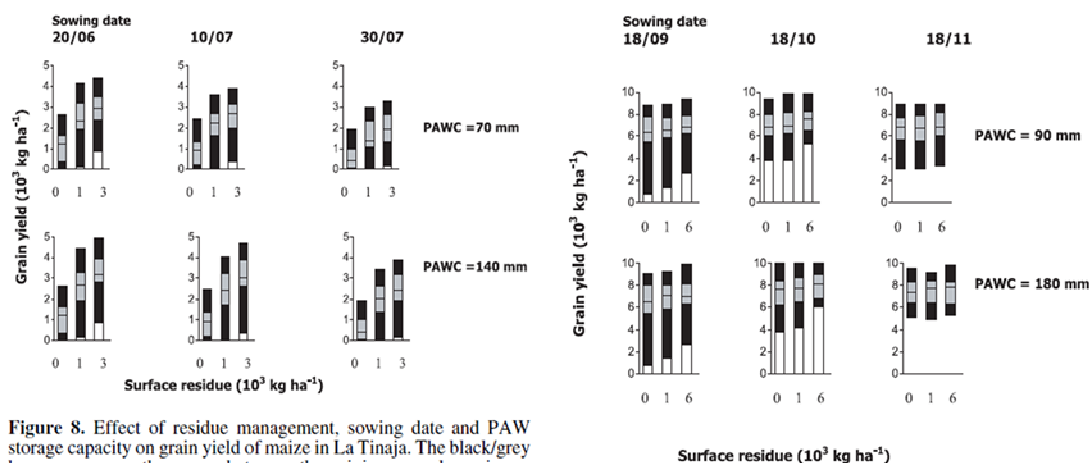


**Figure 4.** Observed (symbols) and simulated (line) PAW (●) (0–180 cm) and maize LAI (○) for two surface residue management treatments during the 2001/2002 growing season in Planaltina.

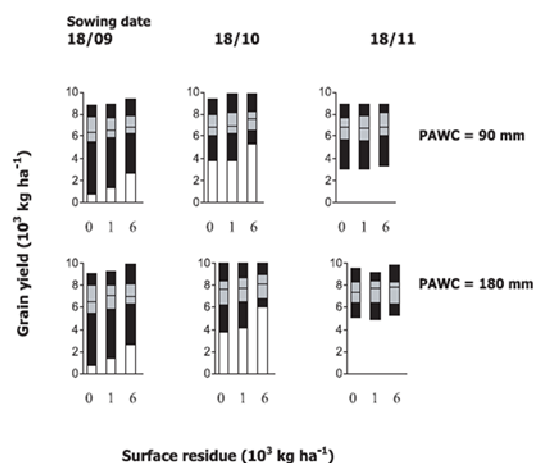
**Figure 4. Exemple d'évaluation de la capacité d'un modèle à prédire l'état hydrique du sol, la croissance et le rendement d'une culture en agriculture de conservation (DMC) et en labour avec résidus enfouis (CT). Le modèle est STICS, modifié pour intégrer l'effet des mulchs pailleux sur les flux hydriques. Extrait de RCL20, 2004.**

Ces travaux ont montré que c'est d'abord via la réduction du ruissellement, souvent élevé (mais pas toujours) en l'absence de paillis, que l'agriculture de conservation modifie le bilan hydrique, cet effet étant suivi par celui de la réduction de l'évaporation. Sous climat semi-aride et lorsque le ruissellement est élevé en gestion conventionnelle du sol, à cause des propriétés du sol ou de la topographie, ou de l'intensité des pluies notamment en début de saison, ces effets peuvent conduire à une réduction de la fréquence et de l'intensité des stress hydriques, autorisant des rendements à la fois plus élevés en moyenne et moins variables entre année. Mais cette situation favorable n'est pas généralisée et selon la distribution des précipitations, cela peut être le drainage sous la zone accessible aux racines qui est augmenté et non pas la transpiration (Fig. 5)

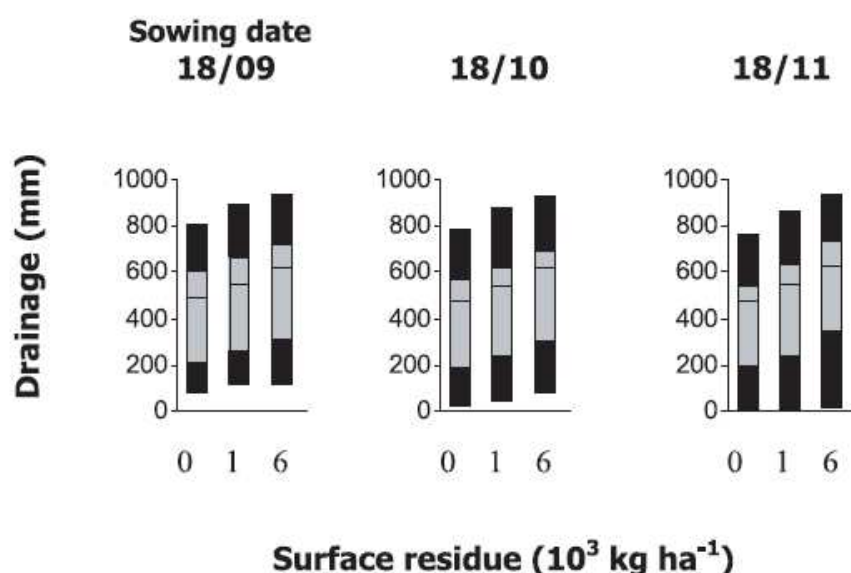




**Figure 8.** Effect of residue management, sowing date and PAW storage capacity on grain yield of maize in La Tinaja. The black/grey bars encompass the range between the minimum and maximum yield, the extremes on the grey bars encompass the range between the 25 and 75 percentiles and the horizontal line shows the median yield level. PAWC: plant-available soil water storage capacity.



**Figure 9.** Effect of residue management, sowing date and PAW storage capacity on grain yield of maize in Planaltina. The black/grey bars encompass the range between the minimum and maximum yield, the extremes on the grey bars encompass the range between the 25 and 75 percentiles and the horizontal line shows the median yield level. PAWC: plant-available soil water storage capacity.



**Figure 10.** Effect of residue management and sowing date on drainage losses in Planaltina for a PAW storage capacity of 180 mm. The black/grey bars encompass the range between the minimum and maximum yield, the extremes on the grey bars encompass the range between the 25 and 75 percentiles and the horizontal line shows the median yield level.

Figure 5. Distributions interannuelles simulées du rendement du maïs au Mexique occidental (« Figure 8 ») et au Brésil Central (« Figure 9 »), et du drainage sous la zone racinaire au Brésil central (« Figure 10 ») en fonction de quantités de paillis de résidus.

Cela se produit notamment lorsque la période d'occurrence des stress hydriques intervient après une période où les précipitations sont en excès par rapport à la capacité de stockage du sol au point que ruissellement élevé ou pas, le sol se trouve à la capacité au champ au début de la période d'arrêt des

précipitations. Des modèles de simulation appropriés permettent de déterminer si, dans une région donnée, compte tenu du climat local appréhendé à travers des séries historiques de données climatiques, et compte tenu également des propriétés de stockage en eau des sols, l'agriculture de conservation est susceptible de réduire les risques liés aux contraintes hydriques ou si elle aura plutôt tendance à augmenter le drainage sous culture.

Dans ce dernier cas de figure, l'introduction de plantes de couverture permet de réduire le drainage et ainsi les pertes de nutriments par le bas de la zone de sol explorée par les racines, tout en produisant un surcroît de biomasse utile pour la constitution des mulchs pailleux ou comme source complémentaire de fourrage (voire de combustible ou de fibre).

Dans le contexte pédo-climatique des Cerrados brésiliens, on a montré que ces systèmes en agriculture de conservation avec plantes de couverture permettent d'obtenir une efficacité élevée d'utilisation des ressources en eau et azote, sous réserve d'un ajustement relativement précis du calendrier de culture. Cet ajustement doit être particulièrement précis lorsque la plante de couverture est semée en relais dans la culture principale, de manière à réduire au maximum les risques de compétitions entre les deux espèces pour le rayonnement, l'eau ou les nutriments (**RCL13, 2011**).

### 3. Evaluation bio-économique des systèmes de culture

Si les déficits de productivité des cultures pourraient être comblés à l'aide de principes agronomiques éprouvés, et qu'il existe de surcroît des techniques de cultures à faible impact environnemental et capables de réduire les risques liés aux interactions entre stress hydriques et intensification, pourquoi n'assiste-t-on pas à une adoption généralisée de l'intensification écologique par les agricultures familiales des pays tropicaux, au moins dans les cas, les plus répandus, où il existe clairement un besoin d'augmentation de la production qui ne saurait être satisfait par la mise en culture de surfaces nouvelles ?

Ce second volet de mes travaux a contribué à répondre à cette question, en privilégiant l'étude du système d'exploitation, vu comme résultant principalement d'une décision stratégique orientée vers un objectif. La stratégie elle-même est vue, dans ces travaux, comme fondée sur une connaissance de l'écosystème exploité, des techniques de production, du marché et des outils institutionnels et financiers constituant l'environnement économique de l'exploitation, et contrainte par des ressources. Ces présupposés m'ont été proposés par les économistes auxquels je me suis associé, spécialistes de l'économie des ménages ruraux. Mon itinéraire sur les terrains du sud et les partenariats que j'ai pu y construire m'ont permis de constituer un ensemble d'études de cas fortement représentatif des agricultures familiales des régions tropicales semi-arides à subhumides, où dominent les cultures céréalières, souvent en rotation avec des légumineuses, associées à des élevages très divers. Dans tous ces cas traités, il était établi que soit le marché soit la croissance démographique des exploitations, et parfois les deux simultanément, constituaient une demande pour la croissance de la production, et l'espace cultivable (physiquement ou reconnu comme tel par la loi) était saturé. Dans tous ces cas encore, de nombreuses familles d'agriculteurs étaient victimes d'une misère évidente, pouvant aller jusqu'à la malnutrition, et la migration pour des durées et à des

distances variables semblait pour certaines familles la seule façon d'ajuster le nombre de personnes aux moyens de subsistance fournis par l'exploitation. Ces cas étaient localisés dans le bassin arachidier Sénégalais (deux sous régions de climats différents), les Cerrados du Brésil (deux régions d'agriculture familiale, l'une issue de l'occupation ancestrale des terres avant le mouvement de colonisation des années 60, et l'autre issue de la réforme agraire des années 90) et les montagnes du Nord du Vietnam (une région à forte densité de population, intégrée au réseau de communication, et une région plus reculée, avec un accès coûteux au marché, de densité de population moins élevée mais avec saturation de l'espace cultivable). J'ai également contribué à des synthèses mobilisant ces cas et d'autres traités à des échelles complémentaires pour une compréhension plus large des contraintes et atouts de l'intensification écologique en agricultures familiales des régions tropicales (RCL14, 2011; RCL21, 2013 ; CO7, 2014).

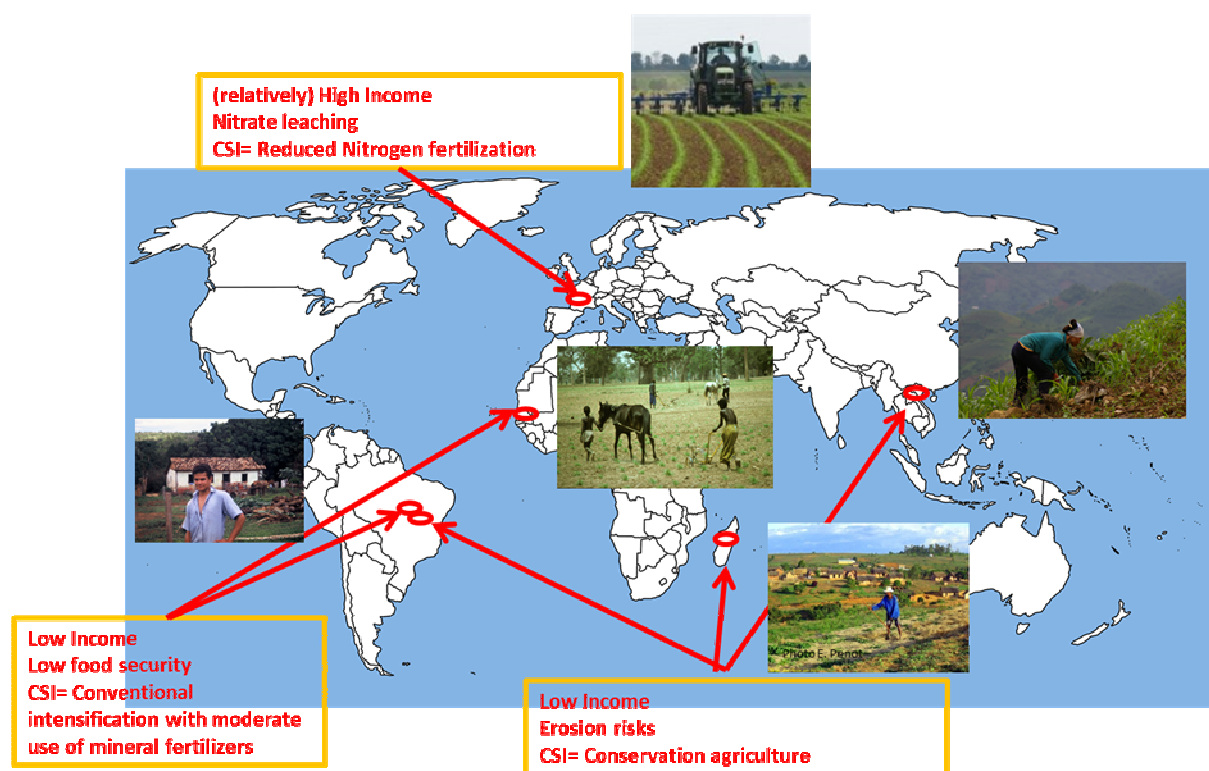


Figure 6. Les études de cas sur l'évaluation bio-économique à l'échelle des exploitations agricoles, de l'intensification écologique. CSI= « Cropping System Ideotype ». Figure extraite d'une communication orale au colloque « Farming System Design », Montpellier 2015 (CCA31).

Tableau 3. Principales caractéristiques des exploitations modélisées dans les études de cas. Table extraite d'une communication orale au colloque « Farming System Design », Montpellier 2015 (CCA31)

Case studies	Predominant Farming system	Farm size (ha)	Number of family members	Number of workers	Total household income (€/capita/year)	Off-farm income (€/capita/year)
Brazil-Conv	Mixed crop livestock in transition toward intensive dairy farms	5-120	2-10	1.5-3.75	40-8000	0
Brazil-CA		16-51	2-4	2-3.8	800-6000	0-560
Vietnam	Mixed crop livestock systems in transition from subsistence to market oriented farms	0.7 – 4.7	5-12	2-7	20-400	0-200
Madagascar		2.5-3.5	5	6	5-800	0
Senegal	Mixed arable farms	3.5-16	12-25	4-10	100-300	0
France		100-120	3-5	0.25-1.1	25000	0

La méthode que nous avons employée dans les études de cas repose sur la construction et l'application de modèles de ferme selon l'approche de l'optimisation sous contraintes multiples (Optimization under Multiple Constraints, OUMC), dans laquelle une procédure d'optimisation recherche la combinaison d'activités de productions animales et végétales prises parmi une liste d'options, qui satisfait le mieux à l'objectif d'un revenu maximal de l'exploitation compte tenu de contraintes de satisfaction chaque année des besoins élémentaires de la famille, de saisonnalité des productions, de disponibilité de la main d'œuvre et de la trésorerie, et de la dotation en terre et en équipement. Ces modèles étaient construits de manière à simuler le portefeuille d'activité détaillé de l'exploitation, c'est-à-dire les différents systèmes techniques utilisés dans les systèmes de culture et d'élevage (avec leur performances agronomiques et éventuellement environnementales), et leur distribution entre les saisons et les unités agroécologiques de l'exploitation, ainsi que le revenu de l'exploitation (y compris la part de ce revenu provenant d'éventuelles activités extra-agricoles) et sa production. Le modèle simule également les surfaces couvertes ou les effectifs du troupeau selon le cas, ainsi que les temps de travaux et les charges pour chaque activité de production végétale ou animale.

Les caractéristiques communes à tous les types d'exploitation que j'ai eu à étudier imposaient une modélisation explicite de l'autoconsommation des produits agricoles pour l'alimentation de la famille, de la mobilisation, au moins saisonnière, de la main d'œuvre infantile et de diverses possibilités d'échanger de la main d'œuvre avec d'autres exploitations ou le marché.

Les modèles différaient d'un cas à un autre par la façon dont étaient explicitées les relations entre agriculture et élevage (valorisation par l'élevage de produits végétaux et valorisation des déjections de l'élevage par les fumures), la dynamique d'adaptation de l'exploitation aux changements de son environnement, et les risques liés à la variabilité interannuelle des prix et des rendements des cultures.

Les principaux types d'exploitation de la région étudiée sont d'abord repérés à l'aide d'une enquête sur un large échantillon. Deux exploitations typiques étaient ensuite sélectionnées dans chaque catégorie pour être modélisées grâce à une enquête plus détaillée. Ces modèles étaient ensuite calés pour s'assurer qu'ils reproduisaient bien les caractéristiques des exploitations observées pour des scénarios de référence dans lesquels d'une part les listes de systèmes techniques mis à la disposition des exploitants simulés correspondaient à ce qui était considéré comme connu des exploitants de la région, et d'autre part l'environnement économique des exploitants (système de prix, disponibilité du crédit, de l'assurance agricole, par exemple) était dans son état actuel. Les paramètres à calibrer étaient un coefficient dit « d'aversion au risque » des exploitants et les coûts de transaction représentant les variations, entre les différentes exploitations, des conditions d'accès au marché.

Les performances des systèmes de culture étaient fournies dans le cas le plus simple par des données d'essais agronomiques conduits dans des conditions voisines de celles de la région, éventuellement complétées par des données de suivis ou d'expérimentations en parcelles d'agriculteurs. Dans les cas plus complexes où le risque lié aux variations interannuelles de rendement était intégré au modèle de ferme, les performances agronomiques des cultures étaient fournies sous forme de séries de données de rendement simulées à l'aide d'un modèle de culture, préalablement calé et validé en utilisant des données de même type que précédemment, pour des séries historiques de 15 à 20 années de données climatiques.

Cette partie de mes travaux a été l'occasion de contribuer à l'encadrement d'étudiants de Master et de spécialité d'ingénieur (ME13 à ME18), en collaboration avec mes collègues économistes. Rapprochant l'étude d'enjeux sociaux plus facile à identifier pour un étudiant que les études portant exclusivement sur le compartiment biophysique des systèmes agricoles, l'interdisciplinarité avec les sciences sociales présentait souvent un attrait particulier pour ces étudiants, pas toujours conscients au départ que cela impliquait aussi des difficultés spécifiques. Je me suis efforcé de réduire ces difficultés en ne proposant ces sujets que dans le cadre de collaborations déjà matures avec mes partenaires économistes, et dans le cadre de projets de terrain solides au plan du fonctionnement logistique.

Par contraste, cependant, un seul des doctorats que j'ai encadrés, (DOC2, 2013) associait agronomie du système de culture et économie. J'ai tendance à penser qu'une thèse doit le plus souvent fonder l'appartenance d'un(e) scientifique à une discipline bien identifiée, quitte à ce qu'au cours de la carrière, s'appuyant sur un crédit et des connaissances acquises dans sa discipline, on s'aventure davantage aux interfaces avec d'autres disciplines. Mais ce type de règle me paraît devoir accepter des exceptions. Je pense disposer aujourd'hui d'un réseau de partenariats entre économistes et agronomes disposant d'une expérience collective de ce type de travaux et de ses pièges, pour qu'il soit aujourd'hui possible de constituer à la fois un comité de pilotage et une équipe encadrante rapprochée appropriées à accompagner un(e) étudiant(e) brillant(e) et motivé(e) à une thèse défendue dans l'une ou l'autre des disciplines agronomie ou économie rurale mais dont le sujet exigerait la mobilisation de l'autre discipline de manière significative.

## *Résultats*

**RCL10, 2016** ; CCA31, 2015 ; CCA22, 2015 ; CO4, 2014 ; CO7, 2014 ; CO11, 2014 ; **RCL16, 2014** ; **RCL21, 2013**; CCA3, 2012 ; CCA23, 2012 ; CCA24, 2012 ; **RCL15, 2011**; CCA13, 2010 ; CCA20, 2010 ; CCA21, 2010 ; **RCL5, 2010** ; **RCL4, 2008** ; CCA17, 2007 ; **RCL3, 2006** ; **RCL12, 2005**, CO10, 2001 ; CCA2, 1998 ; CO3, 1996 ;

Pour les catégories d'exploitations les plus nombreuses dans les régions étudiées, il a toujours été possible d'obtenir une reproduction convaincante des systèmes d'exploitation et des différences entre exploitations par les modèles après calage, ce qui procure une certaine légitimité à l'hypothèse souvent vue comme la plus contraignante à accepter pour la mise en œuvre de l'optimisation sous contrainte : celle que les producteurs agricoles optimisent effectivement la gestion des ressources dont ils disposent en fonction de contraintes et d'une connaissance des performances des systèmes techniques dans les différents environnements qu'ils exploitent, équivalente aux connaissances produites par les dispositifs expérimentaux et les modèles agronomiques.

### *Deux cas permettent de mieux comprendre les contraintes générales à l'intensification :*

Dans le cas du bassin arachidier Sénégalais (PCL3, soumis, CCA22, 2015), dans le centre de la région (520mm, moyenne du cumul annuel 1991-2010), et cela serait probablement vrai a fortiori dans toute la moitié Nord nettement plus sèche, dans les simulations comme dans la réalité les exploitants n'adoptent pas aujourd'hui les systèmes de culture intensifs (culture de maïs avec doses raisonnées d'engrais minéral) que les exploitants placés à environ 140 km plus au sud sous un climat déjà moins aride (775 mm) adoptent. Dans les simulations, c'est à cause de contraintes de trésorerie et de risque plus élevé de mobiliser la trésorerie pour de l'engrais sans augmentation de rendement et donc aux

dépens de la satisfaction de besoins élémentaires de la famille. L'assurance indicielle contre les risques de sécheresse favorise l'intensification et l'augmentation du revenu des exploitations simulées dans les deux zones étudiées dans le bassin arachidier, avec plus d'effet sur les exploitations de la zone du centre que sur celles du sud du bassin arachidier. Mais subventionner le crédit, les engrais ou directement le revenu de l'agriculteur est plus efficace que subventionner l'assurance pour l'augmentation du revenu. Le scénario le plus efficace pour l'intensification et le revenu est un scénario dans lequel le crédit est subventionné pour atteindre des taux faibles et une assurance indicielle est disponible (non subventionnée). Les exploitations simulées réagissent aux scénarios favorables à l'intensification en couplant intensification des céréales et développement d'un petit atelier d'embouche. La trésorerie gagnée par le crédit ou les autres subventions (hors assurance) est mobilisée pour l'achat d'engrais et d'aliment pour le bétail, et la croissance de la production animale intensive se traduit un surcroît de déjections animales utilisées en fumure des parcelles de céréales. Dans ce type de scénario le plus favorable, pour une subvention du crédit de 50000 CFA par exploitation, permettant de ramener le taux de crédit au taux de l'inflation, la production est augmentée de 32 à 35% en valeur selon les types d'exploitation dans le centre du bassin et de 52% à 123% dans le Sud, et le revenu de 14% à 19% au Centre et de 13% à 37% au Sud (chiffres provenant de nouveaux scénarios simulés dans le cadre d'un nouveau projet de publication, et non présentés dans les articles déjà publiés ou soumis).

Dans le deuxième cas (**RCL3, 2006**) sous le climat a priori nettement plus humide (1500 mm de cumul annuel de précipitations annuelles) des *cerrados* du Brésil, il s'agissait d'une petite région où se déroulait une véritable révolution agricole. Certaines exploitations ne suivaient pas le mouvement général de spécialisation laitière reposant en partie sur l'intensification de la culture de maïs et qui permettait de multiplier par dix ou plus les revenus des exploitations en quelques années. Les membres du projet pluridisciplinaire qui accompagnait et étudiait cette révolution (projet Silvânia) proposaient diverses hypothèses pour expliquer cela et notamment une moindre capacité d'entreprendre de la part des agriculteurs concernés ou le mauvais état des routes desservant ces exploitations, rendant plus coûteuses la collecte du lait. Mais les simulations de fermes reproduisaient fidèlement ces différences entre exploitations de structures très voisines en termes de nombre de travailleurs et de bouches à nourrir et de surface arable disponible, sans introduire de différences entre fermes pour les paramètres de l'aversion au risque, des coûts de transaction d'accès au marché et de l'accès au crédit. Dans les simulations, le choix de maintenir des systèmes diversifiés et extensif dans certaines exploitations provenait simplement, dans le système de prix de l'époque, des risques élevés liés aux systèmes intensifs de maïs sur les sols à faible réserve utile de ces exploitations. Les risques étaient aggravés par les méthodes de gestion mises en œuvre par les associations de producteurs pour les tracteurs et semoirs acquis par ces associations, conduisant à des réglages des machines et un calendrier d'intervention inappropriés, avec pour conséquences des peuplements de maïs de faibles densités et une forte pression d'adventices. Ces résultats ont conduit le projet Silvânia à fournir une assistance aux associations de producteurs pour améliorer la gestion de la machinerie collective. Les progrès réalisés ont été spectaculaires et ont conduit un grand nombre d'exploitations situées sur des milieux difficiles à rejoindre le mouvement de sortie de la pauvreté par l'intensification du maïs et la spécialisation laitière.

*Un cas au Vietnam (RCL5, 2010) et un autre cas dans les cerrados Brésiliens (RCL10, 2016) nous ont permis de mieux comprendre certaines contraintes de l'adoption de l'agriculture de conservation par les agricultures familiales.*

Dans les montagnes du Nord du Vietnam au cours de la décennie 1995-2005 un important programme de promotion de l'agriculture de conservation était conduit par les pouvoirs publics Vietnamiens avec le soutien d'agences de développement française et européenne, dans le but de lutter contre l'érosion des sols de cette région dans un contexte de pression croissante de l'agriculture sur les versants montagneux à travers la culture entièrement manuelle du maïs et du riz pluvial, et où l'intensification du riz dans le compartiment irrigable de l'agro-écosystème ne suffisait pas à fournir l'augmentation de production demandée par un marché et une démographie locale en fortes croissances. Une enquête réalisée en 2003 auprès des producteurs d'une région prioritaire de ce programme avait révélé un taux d'adoption à peu près nul des techniques promues. Ces dernières constituaient une gamme de prototypes de systèmes de culture en semis direct sur mulch pailleux, qui avaient été conçus en « matrices de création-diffusion » (Séguy et al., 1996). La raideur des pentes contraignait à maintenir entièrement manuelle la gestion des cultures, et un autre critère important retenu pendant la phase de conception de ces prototypes était qu'il ne devait pas y avoir recours aux herbicides, absents à cette époque du marché Vietnamien et susceptibles d'être associé dans les représentations des agriculteurs à l'agent orange de sinistre mémoire. En conséquence, les paillis devaient être d'une épaisseur suffisante pour agir comme barrière physique à la croissance des adventices, et cela correspondait selon les concepteurs de ces prototypes à des biomasses de pailles de l'ordre de  $7\text{t.ha}^{-1}$  devant être présente au sol au moment de l'installation des cultures. Compte tenu de la faible production de biomasse attendue au moins à court terme en restant dans des apports fertilisants minéraux du même ordre que ceux des systèmes couramment pratiqués dans la région, les biomasses de résidus de culture et des éventuelles plantes de couverture devait être complétées par de la biomasse prélevée dans les cultures conventionnelles ou les espaces non cultivés au voisinage de l'essai, et transportée jusqu'aux parcelles en agriculture de conservation. Les concepteurs de ces prototypes considéraient qu'à long terme, la construction de la fertilité du sol grâce à des apports importants de biomasse au sol permettrait d'atteindre un jour ou l'autre une production de biomasse suffisante pour une production de mulch in situ. Des intrants spécifiques étaient nécessaires à ces prototypes : un apport d'urée était requis en début de cycle pour éviter les risques d'immobilisation d'azote par la microflore du sol dans le contexte d'apports considérables de matière organique, et pour garantir une vigueur suffisante aux plantules de la culture principale pour s'imposer à travers le paillis. A cela s'ajoutait l'achat de semences de plantes de couvertures dans le cas de certains prototypes. Les rendements et les besoins en travail et intrants de ces prototypes étaient connus grâce à des essais agronomiques multi-locaux. Le temps de travail nécessaire à l'opération de constitution du mulch pailleux en mobilisant des biomasses exogènes à la parcelle était supérieur au temps de travail de préparation du sol dans les systèmes dits « conventionnels », et cet excédent n'était pas compensé par la réduction des temps nécessaires aux sarclages, permise par la présence de ces épais paillis, de telle sorte que les prototypes en agriculture de conservation exigeaient un temps total de travail significativement supérieur à celui des systèmes conventionnels. Le coût de leurs intrants était également, mais plus faiblement, supérieur. Selon les sites des essais, les rendements et les marges brutes par unité de surface de ces prototypes étaient significativement supérieurs ou pas significativement différents de ceux des systèmes conventionnels pratiqués par les

agriculteurs, mais leurs marges brutes par journée de travail étaient significativement inférieures ou équivalentes à celles des systèmes conventionnels. Ces éléments d'économie à l'échelle des parcelles étaient insuffisants pour évaluer la pertinence économique des prototypes d'agriculture de conservation pour des exploitants à court terme, c'est-à-dire dans le contexte des quelques années suivant immédiatement la conversion dans ces systèmes à partir des systèmes de culture courants.

L'utilisation de modèles d'exploitation a permis de montrer que pour certains types d'exploitations fortement contraintes en main d'œuvre, les plus fréquentes dans la région intégrée au réseau routier et à l'économie en croissance, notamment du fait d'opportunités extra agricoles pour les travailleurs, les prototypes d'agriculture de conservation les plus performants étaient économiquement inappropriés du fait principalement de leur surcoût en travail au moment de la mise en culture, qui constitue un pic important des besoins de main d'œuvre dans l'exploitation, mais aussi à cause des contraintes de trésorerie pour l'achat des intrants à la même période. Pour des exploitations contraintes plutôt en terres et à condition de retenir les références de performances les plus favorables enregistrées dans le réseau d'essai, ils pouvaient trouver une place dans les exploitations simulées mais avec des surfaces faibles, limitées par les contraintes de disponibilité de la trésorerie au moment de l'achat des intrants.

L'exploration de scénarios de changement dans les caractéristiques des prototypes montre qu'il faudrait abaisser simultanément leurs coûts en travail et en intrants pour provoquer (ou augmenter) leur adoption par les exploitations simulées. Il en résulte que réduire la quantité de pailis à des quantités faibles mais suffisantes pour un effet anti-érosif (de l'ordre d' $1.5 \text{ t.ha}^{-1}$ ) et recourir aux herbicides en substitution de leur effet « barrière physique », n'améliorerait pas leur taux d'adoption dans les exploitations simulées, même dans une hypothèse de disponibilité à bas prix des herbicides. Déplacer la période de constitution des mulchs pailleux vers la période hivernale où la main d'œuvre est moins mobilisée par les travaux agricoles ne suffit pas non augmenter ce taux d'adoption dans les cas où c'est la main d'œuvre qui est la plus forte contrainte, car le coût d'opportunité du travail reste élevé à cette période, où des activités extra-agricoles rémunérées mobilisent la force de travail.

L'exploration de scénarios de subvention de l'agriculture de conservation permet en quelque sorte la mesure de la distance qui sépare les prototypes de solutions « économiquement attractives » pour chaque type d'exploitation étudié, en calculant la surface qui serait convertie en agriculture de conservation, en fonction du montant payé aux agriculteurs par hectare mis en place. Les courbes de réponse ainsi construites sont très différentes entre types d'exploitation, tout particulièrement entre exploitations où ce sont les contraintes de main d'œuvre qui dominent, et les autres types d'exploitations (Fig. 7).



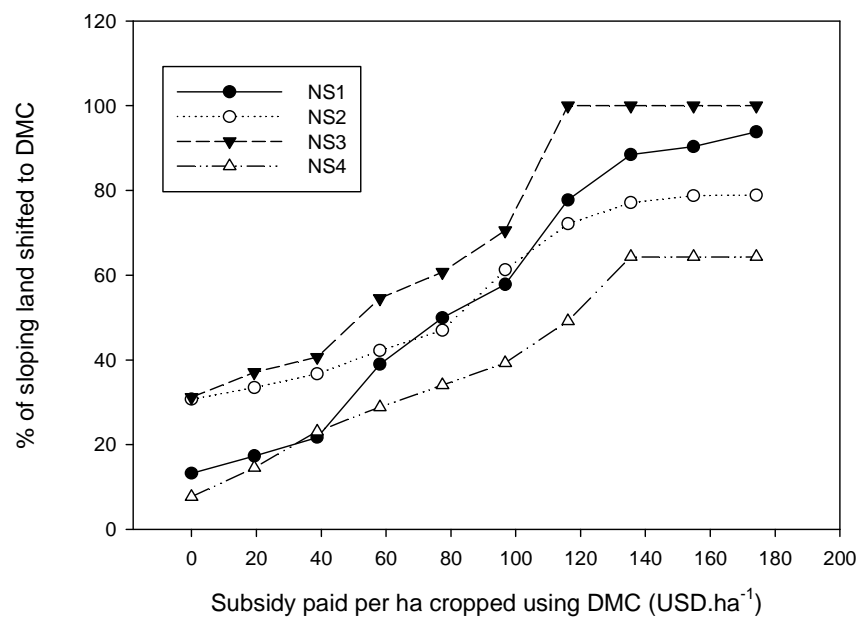
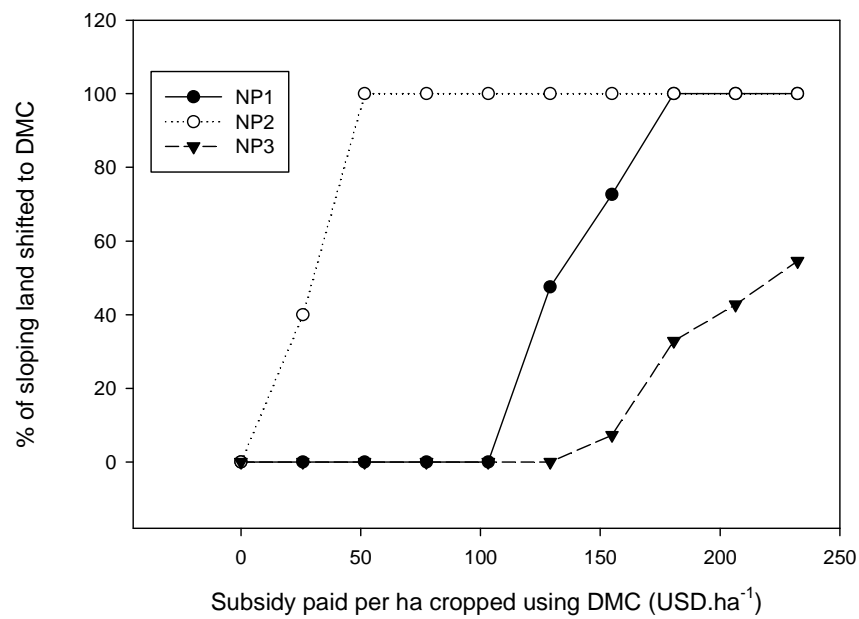


Figure 7. Exemple de réponse simulée pour différents type d'exploitations du Vietnam (NP1 à NP3, dans une région avec forte intégration au marché et possibilités d'activités extra-agricoles, NS1 à NS4 dans une région éloignée du marché), de la proportion des surfaces cultivables conduite en agriculture de conservation, en fonction du montant de subventions. Extrait de RCL5, 2010.

Le second cas portait sur l'agriculture familiale issue de la réforme agraire des Cerrados du Brésil central. Il s'agissait d'exploitations de polyculture-élevage placées à diverses étapes le long d'une transition générale entre des systèmes de subsistance diversifiés et des exploitations laitières intensives. Des systèmes de culture de maïs en semis direct sur mulch de résidus du cycle antérieurs étaient identifiés comme une alternative plus durable aux systèmes de culture moto-mécanisés correspondant à une intensification conventionnelle, le principal risque environnemental de ces derniers dans ce contexte étant le risque d'érosion. Cependant, et c'était en particulier les résultats de travaux de notre équipe signalés dans la section principale précédente, en réduisant le ruissellement pour réduire le risque d'érosion, les systèmes de culture avec mulch pailleux tendent sous ce climat à augmenter les risques de pertes de nutriments à cause d'une augmentation du drainage sous la zone de sol explorée par les racines. Divers travaux (notamment Maltas, 2007; Maltas et al., 2007; Maltas et al., 2009), outre ceux auxquels j'ai contribué et qui sont intégrés dans la précédente section principale de ce bilan, avaient démontré l'intérêt de systèmes de semis direct avec mulch, mais dans lesquels le maïs est suivi d'une plante de couverture pour réduire substantiellement ces pertes de nutriments, et particulièrement d'azote. La modélisation bio-économique mise en œuvre dans ce cas d'étude considérait ces deux types de systèmes en semis direct comme les prototypes de systèmes de culture à évaluer par comparaison aux systèmes effectivement pratiqués par les exploitations. Un modèle de ferme particulièrement sophistiqué a été nécessaire pour ce cas d'étude, de manière à tenir compte de la possibilité de valoriser comme fourrage la biomasse des plantes de couverture et des pailles de maïs, et des dynamiques de croissance et éventuellement de spécialisation laitière de l'atelier d'élevage bovin, sans négliger de considérer des ateliers de petits élevages, notamment de volaille, qui valorisaient la production de grain des exploitations, et persistaient dans les exploitations même les plus fortement spécialisées, sans doute comme une assurance contre les risques de retournement d'une conjoncture favorable à la production laitière. L'étude a montré que contrairement au cas précédent, les prototypes de systèmes écologiquement intensifs étudiés étaient « économiquement attractifs » pour les exploitations étudiées, c'est-à-dire que le modèle simulait leur adoption car ils permettaient une augmentation du revenu de l'exploitation compte tenu des principales contraintes de mobilisation des ressources de l'exploitation entre les différentes composantes d'un système de production susceptible d'être modifié profondément pour valoriser cette opportunité technique (voir la section 4 de la partie bilan des travaux pour une proposition de définition plus précise de ce concept d'attractivité économique à l'échelle des exploitations). Une partie de l'avantage des systèmes en agriculture de conservation venait, dans ce cas particulier, des mauvaises performances agronomiques des systèmes dits conventionnels, en relation avec le fait que les producteurs dépendaient, pour la mise en culture moto-mécanisée du maïs, d'un marché du service horaire de tracteur fournissant des prestations de très mauvaise qualité. Mais dans ce cas de figure, et comme cela avait déjà été démontré dans le cas des grandes exploitations entrepreneuriales des *cerrados* où le semis direct s'est nettement imposé, l'absence de travail du sol constitue une économie de carburant ayant un impact favorable sur la productivité de la terre même à rendement identique et compte tenu d'un emploi accru d'herbicides (Freud, 2005).

*Plus généralement...*

Nos modèles bio-économiques ont permis d'identifier des cas nombreux où il n'est pas nécessaire d'invoquer l'aversion au changement ou au risque des producteurs, ou leur ignorance des alternatives intensives ou éco-intensives aux systèmes de culture qu'ils mettent en œuvre, pour comprendre pourquoi ils n'adoptent pas des propositions techniques qui leur sont faites par des projets de développement. Les contraintes de trésorerie à très court terme et les coûts d'opportunité du travail apparaissent fréquemment comme des contraintes majeures à l'adoption de systèmes de culture intensifs ou éco-intensifs dans les cas que nous avons étudiés, et les variations spatiales et temporelles de l'environnement biophysique peuvent fortement aggraver ces contraintes et rendre les exploitations d'une même région très inégales devant des opportunités créées par l'apparition de nouvelles technologies ou par des changements de leur environnement économique. Il est possible d'extrapoler quelque peu à partir des cas étudiés sur l'agriculture de conservation, en s'appuyant sur d'autres cas d'études (Naudin et al., 2014) et synthèses publiées ces dernières années (Corbeels et al., 2014; Giller et al., 2009; Pannell et al., 2014), pour suggérer que les contraintes financières de court terme sont aujourd'hui une des contraintes majeures à l'adoption généralisée de l'agriculture de conservation dans les exploitations familiales pauvres du Sud. Ceci est tout particulièrement vrai lorsque les systèmes de culture actuellement pratiqués ne sont pas mécanisés ou ne mobilisent pas d'intrants. Car, dans ces cas de figure, le maintien d'un paillis et l'abandon du travail du sol conduisent dans un premier temps à un risque accru de compétition pour les éléments nutritifs avec les adventices et avec les microorganismes du sol, risque qui n'est jusqu'ici maîtrisable à court terme qu'à l'aide soit d'un surcroît de travail, soit d'herbicides et d'engrais minéraux, sans compensation suffisante à court terme par les économies sur d'autres charges. Même s'il s'agit de doses relativement modestes, voire très modestes de ces intrants, ou d'un surcroît modéré de travail, on peut comprendre que des familles dont le revenu est de quelques euros par jour ne s'engagent pas facilement dans cette voie.

#### **4. Problèmes méthodologiques de l'évaluation intégrée des systèmes de production.**

##### *Diagnostic agronomique*

**RCL6, 2013** ; CCA8, 2004 ; **RCL8, 2003** ; CO9, 2001 ; MA3, 2001 ; CCA10, 1994 ; CO1, 1994

Les agricultures des pays industrialisés ont jusqu'à une période encore récente été généralement incitées à viser des rendements très élevés et accèdent facilement à des intrants adaptés à ce projet tels que les fertilisants et les pesticides. Dans les agricultures familiales pluviales des pays du Sud, le faible accès des agriculteurs au marché et donc à ces intrants, conduit à priori à davantage de poids des variations de la fertilité et des bioagresseurs dans les variations de rendement et de leurs écarts au rendement potentiel ou limité par l'eau. L'écart dont il faut diagnostiquer les causes est donc susceptible d'être plus grand et plus variable en agriculture familiale peu intégrée au marché que dans les autres types d'agriculture. De plus le nombre de facteurs impliqués dans les variations de

rendement est susceptible d'être plus élevé. C'est pourquoi le diagnostic agronomique représente un défi particulier dans ce contexte. Relever ce défi est utile bien au-delà des enjeux d'une agriculture à faible intégration au marché, car le projet d'une agriculture globale écologiquement intensive, conduit à assumer que l'environnement ne soit plus artificiellement « nivelé » par un approvisionnement excessif en nutriments exogènes et par une suppression de tous les compétiteurs potentiels des cultures, et qu'il en résulte une grande complexité dans les interactions entre êtres vivants pour la mobilisation des ressources de l'écosystème. Identifier avec précision lesquelles de ces interactions sont favorables à la production agricole et lesquelles y sont défavorables est essentiel pour maintenir à un niveau acceptable les risques pris par les agriculteurs dans cette agriculture écologiquement intensive.

En comparant les rendements réels à des simulations de rendement limité par l'eau, et non plus au rendement potentiel, comme dans la plupart des travaux réalisés par des équipes françaises dans la lignée du travail pionnier de Manichon et Sébillote en 1973 (Dore et al., 1997; Leterme et al., 1994; Manichon and Sébillote, 1973), j'ai réduit le nombre de facteurs et d'interactions entre facteurs susceptibles d'être impliqués dans les écarts à analyser, et donc réduit la dimension du problème à traiter. J'ai ainsi pu montrer qu'il était possible, malgré des rendements réels extrêmement variables et pouvant atteindre des valeurs très inférieures au rendement potentiel, d'identifier le poids des autres facteurs que les facteurs déterminant le rendement limité par l'eau, dans les variations de rendement réel, à l'aide d'analyses multivariées très simples (tableaux de contingences) portant sur des indicateurs de pression d'adventices et de fertilité. J'ai ainsi abouti, pour la même région du bassin arachidier Sénégalais, à un diagnostic plus robuste qu'un diagnostic agronomique « classique » antérieurement réalisé dans la même région (Diouf, 1990), et qui n'avait pas détecté l'importance des interactions entre fertilité du sol et stress hydrique, ni le fait que ces interactions peuvent être fortement défavorables au rendement en grain lorsqu'une consommation d'eau élevée pendant la phase végétative du cycle dans des situations culturales très fertiles, peut conduire à un stress hydrique très sévère pendant la phase sexuée, si la pluviométrie devient à cette période très inférieure aux besoins de la culture.

J'ai par la suite développé davantage la méthode, pour aboutir à une démarche de diagnostic assistée par un modèle de culture. Le modèle a trois fonctions dans cette méthode. La première est de simuler un rendement de référence intégrant déjà les réductions du rendement potentiel dues à des facteurs dont on est à peu près certain qu'ils jouent un rôle dans les variations de rendements de la région étudiée, tels le stress hydrique et le stress azoté, de manière à réduire le plus possible le nombre de facteurs susceptibles d'être impliqués dans les écarts entre les rendements réels et les rendements ainsi simulés. La deuxième fonction du modèle est de réaliser des expérimentations virtuelles sophistiquées dans le but de quantifier le poids, dans les variations de rendements observées dans la région étudiée, de variables particulières du système de culture ou d'indicateurs synthétisant le rôle de plusieurs de ces variables. Ces expérimentations virtuelles, inspirées par des principes utilisés en écologie quantitative (Coquillard and Hill, 1997) consistent à considérer, pour chaque situation réelle observée dans le réseau de situations culturales en parcelles d'agriculteur sur lequel porte le diagnostic, un ensemble de situations culturales virtuelles, c'est-à-dire simulées par le modèle, dans lesquelles certaines variables explicatives du modèle sont fixées aux valeurs observées sur la situation culturelle réelle, tandis que d'autres sont fixées à des valeurs non limitantes, ou à des valeurs choisies comme référence lorsqu'il s'agit de variables pour lesquelles le concept de valeur limitante ne s'applique pas (par exemple la réserve utile du sol, ou la date de semis). On peut définir

ainsi par exemple et dans une première expérimentation relativement simple, une classe de situations culturales correspondant au rendement limité par l'eau, une autre correspondant au rendement limité par l'azote, et une troisième correspondant au rendement limité par l'eau et l'azote. Les rapports entre les rendements simulés dans ces situations culturales virtuelles et le rendement potentiel (correspondant à une quatrième classe de situation culturelle virtuelle servant de référence pour traiter l'ensemble du réseau de situations culturales réelles et de leurs situations virtuelles associées) peuvent être comparés entre eux, donnant accès à l'effet, en termes de pertes de rendement par rapport au potentiel, du stress hydrique, du stress azoté, et des interactions entre stress hydriques et azotés (Fig. 8). Conduire une analyse exhaustive des effets des variables explicatives du modèle et de leurs interactions, dans un environnement donné quelconque, se heurte à des temps de calculs qui deviennent très vite impraticables (avec 50 variables pour chacune desquelles on considérerait 3 valeurs, et disposant d'un ordinateur simulant chaque combinaison en 1 centième de seconde, le temps de calcul serait de l'ordre de  $10^{16}$  années... Le nombre de variables explicatives de modèles tels que Stics, APSIM, ou DSSAT, qui ne prennent en compte que les stress hydriques et azotés, dépasse la cinquantaine, et ces modèles nécessitent un temps de calcul généralement supérieur au centième de seconde sur un ordinateur de bureau). Il est donc nécessaire de raisonner le choix des effets simples et des interactions à considérer, de manière à explorer progressivement l'espace de réponse du modèle à ses variables explicatives, en considérant des groupes de variables associées à un type de stress particulier dans le déterminisme du rendement. C'est donc ainsi qu'on peut prospecter d'abord le rôle des stress hydriques et azotés, pour ensuite étudier le rôle des différentes variables impliquées dans le déterminisme de ceux de ces stress ou interactions entre stress qui sont responsables de pertes de rendement importantes. Par exemple, si le stress hydrique joue un rôle important dans les écarts au rendement potentiel, il peut être intéressant de déterminer si ce stress est favorisé par des faibles réserves utiles du sol, des contraintes physiques ou chimiques à la croissance des racines, un ruissellement important, ou des dates de semis particulières, ou encore l'une ou l'autre des nombreuses interactions possibles entre ces variables. Le tableau 4 donne une illustration de cette analyse par expérimentation virtuelle.

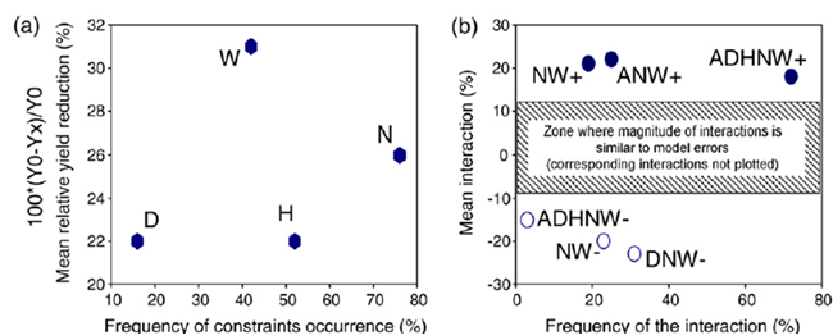


Figure 8. Main yield constraints in Brazil (A: aluminium toxicity; D: plant density; H: weeds; N: nitrogen; W: water). Frequency of occurrence (x-axis) corresponds to the proportion of plots in which relative yield reduction was above 10%. Relative yield reductions (y-axis) are averaged over the plot sample, discarding plots with yield reduction below 10%. Impact of interactions between the constraints added to the model STICS. Main effects (a) and interactions between constraints (b). Interactions are the differences between overall effect of a set of constraints and sum of the main effects of each constraint in the set. Interactions are averaged separately for negative (– symbol: lower yield reduction than expected from the sum of the main effects) and positive cases (+ symbol: stronger yield reduction than expected from the sum of the main effects).

Adapted from Affholder et al. (2003).

Figure 8. Exemple de résultats sur l'importance des principales contraintes agronomiques dans une région (ici au Brésil central), en termes de fréquence d'occurrence et de poids dans les pertes de rendement par rapport au potentiel, des effets simples et des interactions entre contraintes (Extrait de RCL6, 2013 et adapté de RCL8, 2003).

**Tableau 4. Exemple de résultats d'expérimentation virtuelle permettant d'identifier les principaux facteurs responsables des stress hydriques dans la région étudiée au Brésil central (ici le ruissellement n'a pas d'impact sur la distribution simulée de l'effet des stress hydriques sur le rendement dans les situations culturales observées, et c'est la réserve utile qui est la principale source de variation du stress hydrique). Extrait de RCL8, 2003.**

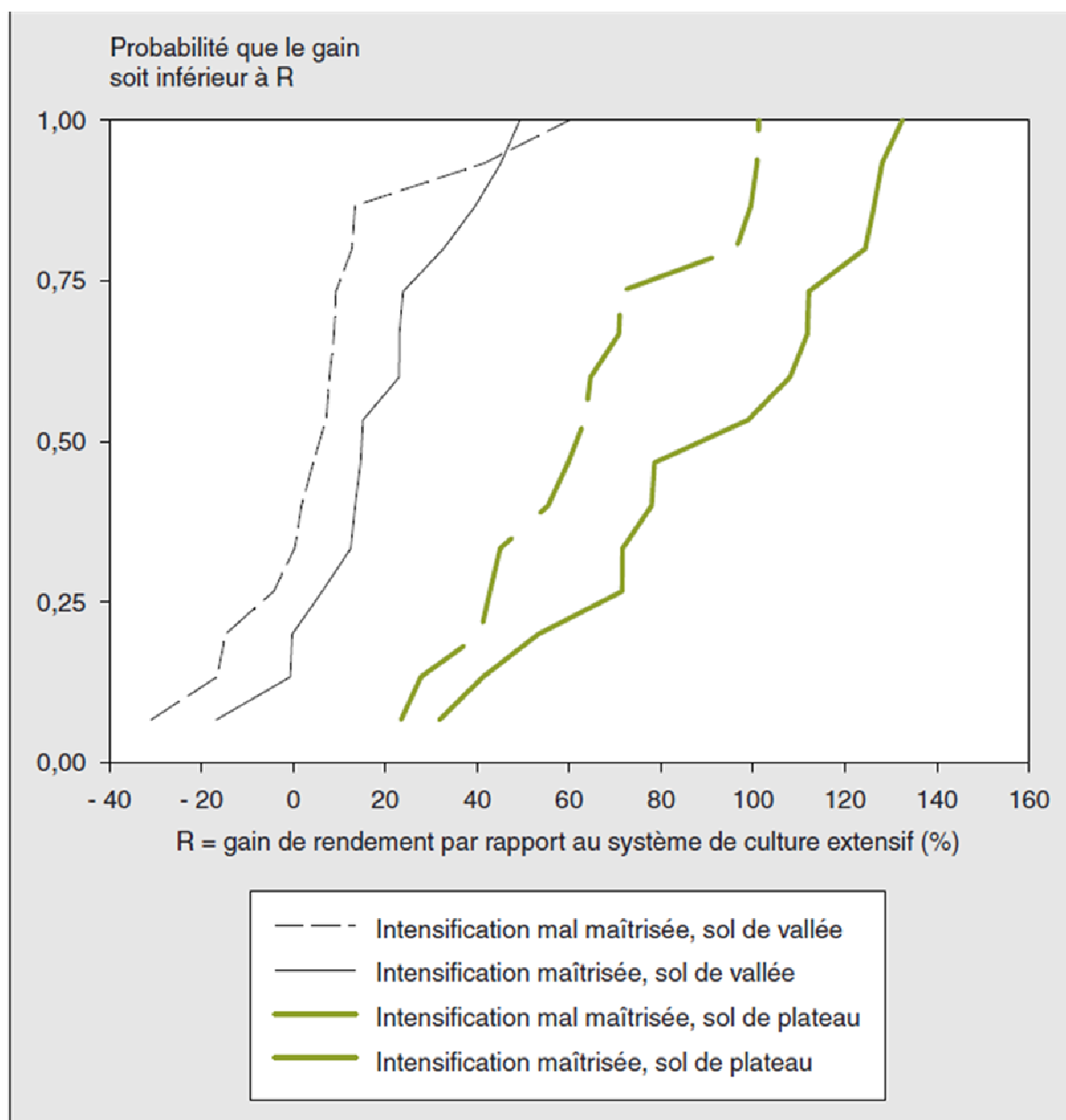
**Table V.** Role played by rainfall (RA), available water capacity (AWC) and runoff (RF) in water constraint occurrence, as simulated with Stics-modified<sup>1</sup>. Stage III of the analysis.

Simulated yield reduction relative to yield potential (%)	Frequency (% plots) of yield reduction according to hypotheses on the main variables affecting water balance		
	effect of rainfall alone: - Observed RA - AWC = 180 mm (100 mm/m of soil) - RF = 0 mm	Addition of the AWC effect: - Observed RA - Observed AWC - RF = 0 mm	Addition of runoff effect: - Observed RA - Observed AWC - RF = 0.3 × RA if RA >15 mm
≤ 10	83	58	58
> 10 and ≤ 30	7	22	22
> 30 and ≤ 50	10	15	15
> 50 and ≤ 70	0	5	5
> 70	0	0	0

The input variables still not introduced into the simulations corresponding to a column were given reference values, whereas all the other input variables were given observed values. However, in the case of RF, which was not measured, a strong runoff (30% of any rainfall over 15 mm) was tested, instead of observed values. Sub-sample C (86 plots).

<sup>1</sup> The new functions are not utilized in these simulations. Identical results would have been obtained using Stics.

Une troisième fonction du modèle est de replacer dans le climat local le diagnostic réalisé grâce aux deux fonctions précédentes, et qui ne porte que sur les quelques années climatiques pendant lesquelles le réseau de situations culturales en parcelles de producteurs a été maintenu. On simule ainsi certaines situations culturales virtuelles, repérées comme typiques des problèmes agronomiques identifiés, pour des séries historiques de données climatiques couvrant un grand nombre d'années, de manière à produire non plus seulement des écarts moyen au rendement potentiel ou les valeurs correspondant aux années pendant lesquelles le suivi est pratiqué, mais les distributions interannuelles simulées de ces écarts. Ces distributions peuvent se révéler très utiles pour identifier les risques liés à telle évolution du système de culture qui pourrait notamment permettre une réduction de l'écart moyen entre rendement réel et rendement potentiel, mais au prix d'une fréquence élevée d'années où le gain de rendement est faible ou nul (Fig. 9). Prolonger ces résultats par un calcul des marges économiques et de leurs distributions permet de tenir compte des risques climatiques dans l'évaluation de la pertinence économique d'options techniques de réduction des écarts au potentiel.



Distributions interannuelles des gains de rendements permis par l'intensification du maïs.

Figure 9. Extrapolation d'un diagnostic agronomique en termes de distribution interannuelle des performances comparées de situations culturales typiques (extrait de RCL3, 2006)

### *Modélisation « ad hoc »*

**RCL18, 2015 ; RCL20, 2004 ; RCL9, 2012;** CCA18, 2004 ; CCA19, 2003 ; CCA27, 2003 ; **RCL8, 2003;** CO9, 2001 ; MA3, 2001 ; **RCL2, 1997; RCL7, 1997 ;** CCA11, 1995; CCA10, 1994 ;

Il n'existe pas, et il n'existera probablement jamais de modèle universel en agronomie ni pour aucun système « complexe » (c'est-à-dire composé d'un grand nombre de variables en interaction). Une fois admis ce constat, et dès lors que l'on pense utile de se munir d'un modèle, quel doit il être ?

Ma confrontation aux écosystèmes cultivés en agriculture familiale des pays tropicaux m'a tout particulièrement sensibilisé à cette question : très tôt dans ma carrière j'ai eu l'occasion de m'apercevoir que les modèles présentés comme les plus « génériques », le plus souvent mis au point par des équipes appartenant aux plus grandes institutions de recherche agronomique du monde développé, échouaient à rendre compte du fonctionnement des écosystèmes cultivés tropicaux.

J'ai en quelque sorte appris « sur le tas » à contourner cette difficulté sans renoncer aux modèles comme outils de représentation et d'analyse des interactions entre variables des systèmes complexes, en créant mes propres modèles ou en introduisant des modifications modestes ou majeures dans des modèles existant, une démarche qualifiée de modélisation « ad hoc » par Sinclair et Seligman (1996).

Dans un contexte où les seuls modèles un tant soit peu robustes pour la prédiction de la croissance et du rendement des cultures annuelles en agriculture familiale des régions tropicales étaient et sont encore les modèles de rendement potentiel et de rendement limité par l'eau, ce sont les diagnostics agronomiques que j'ai réalisés qui m'ont en quelque sorte imposé de recourir à la modélisation, à la fois pour comprendre l'origine des écarts entre les rendements réels et limités par l'eau, et pour replacer dans toutes l'étendue des variations interannuelles d'un climat local, les variations interannuelles de ces écarts constatés pendant les quelques années de suivi du dispositif de diagnostic en réseau de situations culturelles d'agriculteurs.

Ainsi, pour traiter la question de l'interaction entre intensification des cultures et risque climatique au Sahel, j'ai modélisé les relations entre le bilan hydrique des cultures et le développement de leur surface foliaire et de la réserve utile racinaire, sous l'effet de fertilisations organiques ou minérale, ainsi que l'impact des interactions entre stress hydrique et stress nutritionnels sur les rendements en biomasse et en grain du mil et du maïs. Pour traiter la même question dans le contexte de l'agriculture familiale des *cerrados* brésiliens, le diagnostic réalisé m'a conduit à modéliser l'effet sur la croissance racinaire de l'anoxie due à l'excès d'eau, et de l'excès d'aluminium échangeable ou de carence en calcium dans le sol. J'ai également du modéliser la compétition entre le maïs et les adventices pour la lumière, l'eau, et l'azote, en tenant compte de la densité de peuplement du maïs, de variations de l'efficacité des sarclages mécaniques ou de l'application d'herbicides selon que ces actions étaient suivies rapidement ou non d'un événement pluvieux, et de l'impact du calendrier de préparation du sol et de semis sur la croissance des adventices. Pour évaluer l'impact de l'agriculture de conservation sur le bilan hydrique des cultures et leur rendement limité par l'eau, j'ai contribué à la modélisation des effets de mulchs pailleux sur le ruissellement, l'évaporation du sol, et le stockage d'eau de pluie dans la porosité du paillis et son évaporation. Enfin, pour évaluer les contraintes à



l'introduction d'une culture supplémentaire au printemps dans un climat tropical d'altitude, les travaux d'un doctorant que j'ai encadré ont conduit à modéliser l'impact de basses températures sur la survie des plantules de diverses espèces.

Pour tous ces travaux de modélisation j'ai procédé en suivant les principes énoncés par Sinclair et Seligman (1996):

- définir clairement l'objectif assigné au modèle (et veiller à ce qu'il soit modeste)
- en déduire des critères d'évaluation du modèle (par exemple capacité à prédire le comportement d'un système, ou capacité à identifier des lacunes dans nos connaissances)
- construire un modèle aussi simple que permis par la nature de l'objectif en utilisant des logiciels appropriés (plateformes de modélisation spécialisées, pour des modèles complexes, ou logiciels commerciaux de modélisation pour des problèmes plus simples)
- Choisir et représenter le niveau d'organisation du système modélisé en fonction du niveau d'organisation sur lequel porte le problème à résoudre
- Autant que possible, utiliser des relations simplifiées ayant fait la preuve de leur robustesse (« summary relationships »).

S'y ajoutait le principe énoncé par Passioura (1996) de recherche du meilleur compromis entre erreur de structure du modèle (erreurs liées aux simplification des processus agissant dans la réalité, d'autant plus faible que le modèle intègre la complexité du système réel), et erreurs de paramètres (liées aux erreurs d'estimation des paramètres, et qui augmente avec le nombre de paramètres). Ce principe est parfois assimilé à principe de parcimonie, et il est également parfois assimilé à la résultante du principe de minimisation des erreurs de paramètres et d'une contrainte de coût de mesure de certaines variables, contrainte particulièrement aiguë dans le contexte de pays en voie de développement. J'ai du, bien entendu, composer également avec cette contrainte, mais plutôt en assumant qu'elle pouvait me conduire à m'écarter du meilleur compromis résultant des principes précédents, car la hiérarchie des coûts d'accès aux variables d'un système n'est pas nécessairement la même que la hiérarchie des rôles de ces variables dans le déterminisme de la ou des variables qu'on a besoin de prédire pour un objectif particulier donné.

Mais la littérature ne proposait pas de méthode convaincante pour déterminer, en pratique, ce que doit être le contenu d'un modèle « ad hoc ». La hiérarchie des rôles des variables d'un système dans le déterminisme des variables d'intérêt paraît logiquement être un guide essentiel pour distinguer entre ce qui doit être représenté dans un modèle et ce qui peut être ignoré. Or le but du diagnostic agronomique est précisément d'établir cette hiérarchie dans le cas d'écosystèmes cultivés. C'est donc assez naturellement qu'en plus d'être ce qui conduisait à identifier un besoin de modélisation, le diagnostic agronomique est devenu pour moi un élément clef d'une méthode de modélisation *ad hoc*.

J'ai tout particulièrement développé et mis en œuvre cette approche à l'occasion de l'étude des facteurs biophysiques et économiques déterminant les trajectoires des exploitations familiales des *cerrados*. J'ai présenté plus haut ce travail sous l'angle du diagnostic agronomique, et sous l'angle de l'application de modèles bio-économiques. Dans ce qui suit, il est présenté sous l'angle de la modélisation *ad hoc*, précisément pour les besoins de l'étude bio-économique du poids des performances agronomiques et de leur variabilité interannuelle dans les stratégies des producteurs

d'une région. Je suis parti d'un modèle de culture présenté comme générique, c'est-à-dire susceptible d'être applicable pour un grand nombre d'environnements et de systèmes de culture, le modèle STICS (Brisson et al., 2003; Brisson et al., 1998). Ce modèle était à l'époque conçu pour simuler les rendements potentiel, limité par l'eau, limité par l'azote, et limité par l'eau et l'azote, pour un certain nombre d'espèces cultivées. Mais l'évaluation du modèle par confrontation à des données observées de dynamique de croissance du maïs (LAI, biomasse, grain) et de dynamique du stock hydrique sous culture, obtenues dans des situations expérimentales des *cerrados* où les stress hydriques et azotés étaient à la fois variés et les seuls facteurs susceptibles de réduire les rendements par rapport au potentiel permis par le rayonnement, a montré que les erreurs d'estimation de STICS étaient beaucoup trop élevées pour l'application projetée et son contexte. J'ai ainsi eu d'abord à l'adapter, puis à caler et valider le nouveau modèle pour l'environnement et les systèmes de culture de l'agriculture familiale des *cerrados*. Dans un deuxième temps, le diagnostic opéré à l'aide de la première fonction du modèle décrite dans la section précédente, a conduit à identifier comme facteurs fréquents de la réduction du rendement dans la région la toxicité aluminique et l'excès d'eau, via leurs effets contraignant l'exploration en profondeur du sol par les racines, et donc leur interaction avec les stress hydriques, ainsi que les adventices et leurs interactions avec la densité de peuplement, et avec les stress hydriques et azotés. De manière à pouvoir bénéficier des deux autres fonctions du modèle décrites plus haut, mais aussi et surtout dans l'objectif de fournir les simulations de rendements nécessaires au modèle de ferme, j'ai enfin modifié fortement STICS pour en faire une version *ad hoc* pour cette étude bio-économique, en intégrant de nouveaux formalismes simulant les effets de ces facteurs identifiés et non pris en compte dans la version « générique » de STICS. La démarche de diagnostic assisté par modèle décrite plus haut peut donc aussi être vue comme une démarche itérative de diagnostic et de modélisation aboutissant à un modèle *ad hoc* des variations de rendement dans un contexte donné.

Ma démarche privilégiant la modélisation *ad hoc* par rapport au recours sans modification à des modèles génériques m'a valu des critiques récurrentes, de la part non pas de chercheurs confrontés au même problème que moi, mais de la part des responsables des équipes ou unités auxquelles j'appartenais. Ces critiques étaient fondées sur l'idée simple que le coût de l'écriture, notamment informatique, d'un modèle, est trop élevé pour qu'on se permette de modéliser « dans son coin » sans contribuer à un projet collectif d'ampleur... Lassé de devoir sans cesse justifier ma méthode de travail auprès de mes responsables, j'ai fini par consacrer un peu d'énergie à une analyse approfondie de la littérature sur la question, et à une réflexion non moins approfondie à laquelle j'ai associé quelques uns de mes collègues les plus concernés par cette difficulté. L'article qui rend compte de ce travail (RCL9, 2012):

- confirme que le projet d'un modèle universel n'est pas pertinent. Il a cependant sa cohérence dans un certain cadre épistémologique : il correspond notamment à une posture positiviste (la science aurait pour but de dévoiler « la vérité », vue comme indépendante de toute théorie et expérience), éventuellement complétée par un certain dogmatisme dans le réductionnisme méthodologique (les propriétés d'un système à l'échelle quelconque ne résultent que des processus « élémentaires » intervenant aux niveaux d'organisation « les plus simples » du système). Il me semble pour ma part que l'épistémologie du XX<sup>e</sup> siècle a largement montré les incohérences de ces postures (voir par exemple Chalmers, 1976, 2006);

- montre que la substitution du terme « universel » par le terme « générique » pour qualifier l'ambition d'un modèle ou d'un projet de modélisation ne suffit pas à se débarrasser de la question de savoir si un modèle donné est adapté à un objectif d'application donné ni celle, corollaire, de savoir quel modèle est adapté à une question donnée;
- suggère que les principes proposés par Sinclair et Seligman en 1996 pour une approche alternative, la modélisation *ad hoc*, restent largement valables malgré le relativement faible nombre de travaux qui s'en revendiquent depuis leur formulation ;

Cet article fait également la synthèse des progrès méthodologiques accomplis depuis l'article de Sinclair et Seligman pour la construction de modèles *ad hoc*. Il propose de distinguer deux principaux types de problèmes à résoudre: comment définir la structure du modèle (conceptualisation du modèle) et comment minimiser les efforts de développement logiciel lié à l'écriture du modèle (informatisation du modèle).

En ce qui concerne la conceptualisation du modèle, deux grands types d'approches sont possibles : une approche « ascendante » où l'on part du problème à traiter pour construire un modèle, et une approche « descendante » où l'on part du modèle le plus complet possible et où l'on évalue s'il s'applique au problème à traiter (Hammer and Muchow, 1994; Legay, 1996). Située typiquement dans le cadre de l'approche ascendante, la méthode itérative de diagnostic et de modélisation décrite ci-dessus constitue mon apport à un ensemble de méthodes d'analyses multi-variées du système à modéliser pour établir la hiérarchie des variables et processus à prendre en compte. Ces méthodes paraissent relativement lourdes si on les applique rigoureusement et de manière à pouvoir en restituer les étapes de manière formelle, mais les modélisateurs expérimentés les pratiquent en mobilisant également leur expertise et leur intuition en procédant une succession éventuellement rapide d'essais et d'erreurs, où ce qui compte c'est davantage le résultat final, c'est-à-dire un modèle apte à ce pour quoi on a besoin de lui, plutôt que les moyens par lesquels on y est parvenu. Quelques travaux récents proposent justement des systèmes d'aide à la décision adaptés à cette approche, capitalisant l'expertise accumulée sur les différentes façons de modéliser l'écosystème cultivé. Sur la base de critères décrivant la culture à simuler, les itinéraires techniques à considérer, les échelles de temps et d'espace de la simulation, la précision recherchée, et les principaux facteurs limitants à prendre en compte, l'outil sélectionne et aide à assembler comme des briques d'un jeu de construction différents modules, pris dans une bibliothèque et correspondants à des processus ou des ensembles de processus et à niveaux particuliers de détail auxquels ils sont représentés (Adam et al., 2012). Chaque module est également assorti d'un jeu de règles visant à identifier les conditions dans lesquelles il constitue un choix cohérent d'association à d'autres modules. Il peut évidemment arriver qu'il manque dans la bibliothèque des modules correspondant aux critères exprimés, le modélisateur est alors invité à créer et ajouter ses propres modules. Il est probable que ce type de situation soit particulièrement fréquent, et pour encore longtemps, pour la modélisation d'écosystèmes cultivés en agriculture familiale à faible intégration au marché.

Une approche descendante de la conceptualisation du modèle consiste à utiliser un modèle générique pour le « dégrader » en un modèle plus simple (« summary model » Bouman et al., 1996). Ce modèle est en fait constitué de courbes ou surfaces de réponse du modèle de référence à ceux des paramètres auquel il est le plus sensible dans l'écosystème cultivé étudié (c'est-à-dire pour les intervalles de variations de ces paramètres dans cet écosystème). Le principal risque de cette

approche est que le choix du modèle de référence biaise la construction du modèle simplifié, si le modèle de référence néglige lui-même un phénomène ayant en réalité une grande importance dans l'écosystème cultivé étudié. La seule manière rigoureuse de s'en prémunir serait d'évaluer de manière approfondie le modèle de référence, ou mieux une pré-sélection des modèles « génériques » disponibles, en le ou les confrontant à un ensemble de situations culturelles très diversifiées et représentatives de l'écosystème cultivé à étudier. Le dispositif nécessaire serait alors sans doute au moins aussi lourd que celui exigé par un diagnostic agronomique, ce qui rend finalement en toute rigueur l'approche descendante au moins aussi lourde et exigeante en données observées que l'approche ascendante, contrairement à un préjugé assez commun (hérité du préjugé qu'un modèle « générique » est à priori digne de confiance...dans un grand nombre d'écosystèmes cultivés).

Aucune de ces deux approches ne prétend aboutir au meilleur modèle possible pour la question à traiter et son contexte. Mais peut être que leur emploi conjoint pourrait aider à encadrer au mieux le minimum de la somme des erreurs de structure et de paramètre du modèle (Fig. 10) ?

Le principal écueil à éviter, quelle que soit l'approche retenue, est d'ignorer qu'il y a inévitablement une part de subjectivité dans les choix opérés pour construire le modèle conceptuel (et mathématique).

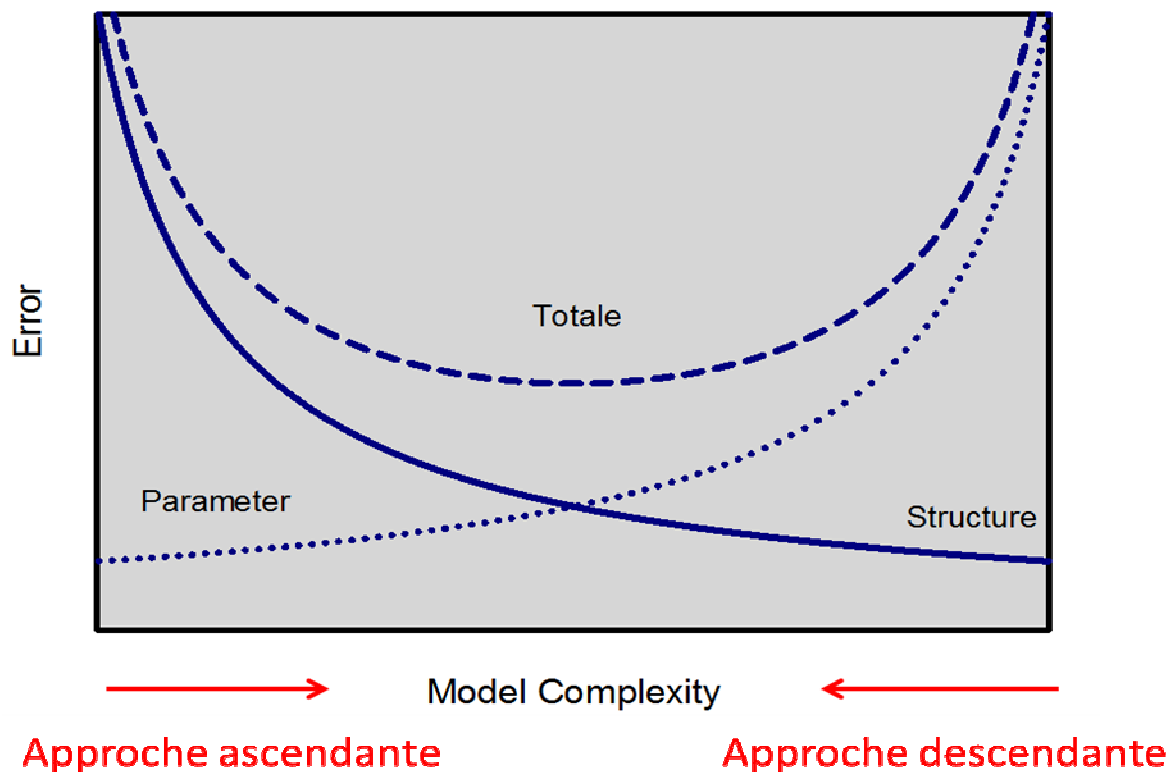


Figure 10. Erreurs de structure et de parametres en fonction de la complexité du modèle. Adapté de Passioura, J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal* 88, 690-694

## Informatisation du modèle : comment minimiser les efforts de développement logiciel ?

### « Mains dans le cambouis »

Cette démarche résulte du constat que le codage, dans un langage de programmation informatique à peu près quelconque, des équations mathématiques constitutives d'un modèle, ne demande pas de compétence de spécialiste du développement logiciel, et fait même partie des compétences attendues aujourd'hui de n'importe quel étudiant en troisième année d'études supérieures scientifiques. Les outils de développement logiciel les plus couramment utilisés par les professionnels de l'informatique sont certes coûteux, en constante évolution et difficiles voire très difficiles à maîtriser pour un non spécialiste, mais il existe des outils beaucoup plus simples, dont certains gratuits ou intégrés par défaut dans les suites bureautiques du commerce. Par contre, la gestion des entrées et sortie des modèles et l'automatisation des simulations pour réaliser des expériences virtuelles complexes sont bien des composants logiciels dont le développement est le plus souvent confié légitimement à des informaticiens professionnels, notamment dans le cas des modèles « génériques » qu'on souhaite doter d'interfaces-utilisateurs pour les rendre « faciles à utiliser ». Mais une utilisation intelligente des suites bureautiques communes, et notamment des bases de données relationnelles, permet de s'affranchir de ces composants. Cela requiert certes la maîtrise de la construction de requêtes complexes et de quelques fonctions avancées des gestionnaires de bases de données, mais qui peut prétendre modéliser des systèmes complexes sans avoir des compétences étendues dans la gestion et la manipulation des données expérimentales nécessaires à la modélisation ou produites par les simulations ?

### Logiciels de modélisation du commerce.

Il existe dans le commerce un certain nombre de logiciels dont le but est de permettre l'écriture et l'utilisation de modèle sans disposer de compétences particulières en informatique (par exemple Stella, ModelMaker, PowerSim...). Ces logiciels proposent en général un environnement graphique dans lequel l'utilisateur représente son modèle par des boîtes dans un réseau de liens, comme dans la plupart des méthodes de représentation des modèles conceptuels. Les liens correspondent aux relations entre les objets modélisés, et l'utilisateur accède à un éditeur spécialisé où il mathématise ce lien à l'aide des opérateurs classiques et de fonctions prédéfinies. Le logiciel convertit l'ensemble en code exécutable dans un langage interprété spécifique. Les principales limites de cette approche sont le coût relativement élevé de ces outils, dont il faut équiper chaque machine où le modèle sera utilisé, ce qui en limite fortement la « portabilité », et une relative lenteur des calculs dommageable à la création de modèles ou expérimentations virtuelles très complexes. Cette démarche n'est pas non plus très adaptée au recyclage, dans un nouveau modèle, de composants de modèles plus anciens qui apparaîtraient adéquats pour le modèle projeté. Enfin, le très grand nombre de domaines pour lesquels ces outils prétendent faciliter le travail de modélisation fait que leur documentation est parfois assez abstraite et que les exemples et illustrations ont peu de chances de concerner l'agronomie. Cela peut rendre difficile les premiers pas avec le logiciel, et même empêcher certains utilisateurs potentiels d'identifier en quoi ces outils peuvent leur être utile dans leur domaine spécifique, à moins d'être initiés par un collègue.

## Plates-formes de modélisation

Depuis un peu plus d'une décennie, apparaissent des outils, qualifiés de « plateformes de modélisation », orientés spécifiquement vers la communauté des modélisateurs en agronomie. La plupart des modèles « génériques » développés depuis les années 80 ont évolué aujourd'hui vers ces plateformes de modélisation avec une revendication croissante d'un objectif de flexibilité, en lieu et place de l'objectif de généricité justement, ce qui peut témoigner sans doute de la pertinence des principes établis par Sinclair et Seligman en 1996 et de leur pénétration progressive dans la pratique des modélisateurs, y compris membres de communautés fondées autour du mythe du modèle universel. Ces plateformes sont conçues en général pour faciliter la gestion des entrées et sorties, l'automatisation de simulations multiples pour l'expérimentation virtuelle, l'évaluation des modèles par les outils statistiques (analyses d'incertitude et de sensibilité, estimation des paramètres, optimisation), et la combinaison entre eux de composants de modèles déjà existants pour constituer des « solutions de modélisation » originales ou adaptées à tel ou tel grand type d'environnement ou de système de culture. Cette dernière tâche impose cependant le plus souvent que les composants à associer obéissent à un certain cadre logique de règles, de manière à faciliter la vérification de leur interopérabilité puis le couplage proprement dit. L'intégration d'un modèle existant dans ces plateformes requiert ainsi souvent sa réécriture complète sous le contrôle d'un informaticien impliqué dans la conception ou la maintenance de la plateforme, de même que l'intégration d'un composant nouveau se fait en général en lien étroit entre les agronomes, dont les compétences ne permettent pas nécessairement de comprendre ce cadre de règles, et les informaticiens. Même lorsque tous les composants susceptibles d'être assemblés ont été écrits dans le respect des prescriptions de la plateforme, la construction d'une solution originale requiert le plus souvent l'interaction entre les agronomes, les spécialistes de mathématiques appliquées et les informaticiens familiers de la plateforme, pour s'assurer que l'assemblage des éléments de programme est réalisé en cohérence avec les modèles conceptuels et mathématiques sous-jacents. Cette importante limite à l'autonomie des agronomes dans leur emploi de ces plateformes suggère qu'elles ne doivent pas être vues simplement comme un outil logiciel, mais aussi comme un espace de collaboration entre spécialistes du domaine à modéliser et spécialistes de l'informatisation des modèles. Enfin les domaines d'application de ces plateformes sont généralement définis de manière assez vague, comme par exemple « la modélisation d'agroécosystèmes », mais les auteurs de ces plateformes ont nécessairement une représentation particulière de ce domaine. Si le projet de modélisation s'écarte par trop de cette représentation, il est fort possible que la plateforme s'avère inapte à l'accueillir.

En conclusion sur la méthodologie de modélisation *ad hoc*, l'article (RCL9, 2012) met en évidence qu'il n'existe pas de méthode parfaitement objective et automatique d'assemblage de modèles à partir de composants élémentaires en fonction d'une question à traiter. Il ne peut y avoir de modélisation ambitieuse sans collaboration entre spécialistes des systèmes représentés, mathématiciens et informaticiens (avec ce que cela suppose de capacité de compréhension mutuelle à développer). Les plateformes sont à la fois des outils de facilitation de ces collaborations et de capitalisation de leurs acquis. La part de subjectivité inhérente à la modélisation doit être assumée: elle impose de favoriser la diversité des approches. A moins de projets particulièrement ambitieux nécessitant la collaboration de nombreux spécialistes, ou de modélisation dans le but de capitalisation de connaissances, pour lesquelles l'approche « modèle génériques » intégrés à une

plateforme de modélisation » paraît justifiée, l'approche « mains dans le cambouis » pour l'informatisation, et une association entre les approches « itérations de diagnostics et modélisations » et « summary models », pour la conceptualisation du modèle, me paraissent personnellement les voies à privilégier comme assumant clairement l'enjeu de disposer de modèles *ad hoc*, et la part de subjectivité inévitable de la modélisation, tout en garantissant un contrôle maximal des agronomes sur le modèle qu'ils élaborent. Cela dit, les difficultés d'une modélisation *ad hoc* ne doit pas faire oublier que l'enjeu principal pour élaborer des modèles utiles est de disposer de données de qualité sur le fonctionnement des systèmes que l'on souhaite modéliser.

### *Méthodes d'évaluation multi-critères de la durabilité des systèmes de culture*

CCA31, 2015 ; **RCL10, 2016** ; **RCL16, 2014** ; CCA3, 2012 ; CCA14, 2010 ; CCA29 ; 2010

De manière plus modeste que pour ce qui précède sur les méthodes de diagnostic agronomique et de modélisation *ad hoc*, j'ai contribué au débat sur les méthodes d'évaluation multi critère de la durabilité des systèmes de culture. L'évaluation de la durabilité des systèmes de culture implique de prendre en compte en effet plusieurs critères relatifs aux domaines sociaux, économiques et environnementaux, ce qui en soi impose aux chercheurs travaillant sur ces méthodes au moins l'intégration multidisciplinaire des connaissances et souvent l'interdisciplinarité à proprement parler, et ce que cela comporte de difficultés. En outre l'identification de ces critères et de leur hiérarchie est susceptible de dépendre fortement des points de vue des différents acteurs (agriculteurs, techniciens, chercheurs, décideurs politiques...) dont les priorités et intérêts sont très différents et entre lesquels un compromis est à rechercher. L'émergence puis la relativement rapide popularité, en France notamment, des méthodes fondées sur les hiérarchies multi-attributs (MAH-Multiple Attribute Hierarchy), présentées comme une manière de relever ce double défi, conduisait naturellement à s'y intéresser. La méthode MAH consiste en une classification d'objets (dans notre cas des systèmes de culture) caractérisés par des critères, auxquels sont attribuées des valeurs sur une échelle qui peut être propre à chaque critère. La classification est opérée grâce à des pondérations et des règles d'agrégations entre critères. Non seulement les valeurs attribuées aux critères mais aussi la sélection des critères, les pondérations et les règles d'agrégation entre critères peuvent être définis de manière participative associant tous types d'acteurs.

Une revue de littérature publiée par Sadok et al. (2008) suggérait la supériorité de ces méthodes sur celles que j'avais employées jusque là, basées sur l'optimisation sous contraintes multiples en programmation mathématique (OUMC –Optimization Under Multiple Constraints décrite dans la section 3 de ce mémoire, appartenant à la large famille des méthodes de type MODM, Multiple Objective Decision Making dans l'article cité). L'expérience acquise sur la méthode OUMC par les équipes auxquelles j'ai appartenu en la mettant en œuvre sur divers terrains d'Afrique, Asie, Amérique Latine et Europe, synthétisée dans une communication orale au congrès « Farming System Design de 2015 (CCA31, video disponible ici : [http://fsd5.european-agronomy.org/video/FSD/M\\_327\\_Francois%20A/index.html](http://fsd5.european-agronomy.org/video/FSD/M_327_Francois%20A/index.html) ) me permet tout d'abord d'affirmer que contrairement à ce qui est dit dans la revue de Sadok *et al.*, la méthode OUMC ne se distingue pas de l'approche MAH par le nombre ou le type des critères qui peuvent être pris en compte, ni par le nombre des systèmes de culture (ou d'élevage) mis en comparaison, ni par la possibilité ou non d'ordonner les systèmes de culture évalués par degré de satisfaction des critères, ni encore par l'impossibilité de mobiliser des variables qualitatives

(discrètes). Un certain nombre d'arguments conduisant à suggérer la supériorité des méthodes de type MAH sur OUMC s'avèrent ainsi erronés et proviennent probablement d'une connaissance insuffisante des ressources et caractéristiques de cette dernière, mais il faut souligner que le domaine général des méthodes d'aide à la décision multi-critères, auquel appartiennent OUMC comme MAH est d'une ampleur telle et couvre des applications de nature tellement diverse qu'il est très difficile de saisir les contraintes et avantages techniques de toutes ses méthodes particulières, et l'article en question le reconnaît d'ailleurs.

Par ailleurs, dans le cadre du projet « Unai » de l'EMBRABA et du Cirad dans une communauté rurale issue de la réforme agraire dans les *cerrados* Brésiliens, il a été possible mettre en œuvre simultanément les deux méthodes pour évaluer des systèmes de culture en agriculture de conservation. L'analyse comparative de ces méthodes qui a été conduite sur ce cas n'a donné lieu pour l'instant qu'à une communication de colloque (CCA14, 2010), et elle mériterait sans doute une publication plus complète.

Le principal enseignement de cette opération est que la méthode MAH, facile à décrire, comprendre et utiliser, est nettement mieux adaptée que OUMC à la représentation et la mise en discussion des points de vue des acteurs sur des systèmes de culture ou prototypes de systèmes de culture. Cela dit, cette facilité de mise en œuvre de MAH doit être quelque peu relativisée. En effet, s'agissant des exploitants agricoles, qui prennent la décision d'adopter telle ou telle pratique culturale, on peut se poser la question de l'intérêt de leur demander un point de vue sur des techniques dont ils n'auraient pas déjà l'expérience, et donc admettre qu'il faut tout de même au minimum avoir effectué des tests des systèmes de culture chez des agriculteurs, ce qui n'est tout de même pas rien, avant de les prier de participer à une application de la méthode. La méthode OUMC peut au contraire être appliquée à des exploitations n'ayant eu aucune expérience préalable des systèmes à évaluer, à condition (1) de réaliser des enquêtes de modélisation du système d'exploitation, ce qui est plutôt moins lourd que des tests en parcelles d'agriculteurs, et (2) de disposer de références sur leurs performances agro-environnementales, obtenues donc ailleurs mais extrapolables (éventuellement à l'aide de modèles de culture) à la localité étudiée. Mais surtout, OUMC présente un autre avantage, à mes yeux absolument primordial pour une conception de systèmes de production qui anticipe un tant soit peu les changements globaux: la possibilité d'analyses prospectives des dynamiques d'évolutions des systèmes d'exploitation en fonction de scénarios d'évolution de leur environnement économique (système de prix, instruments financiers,...) et biophysique (dégradation des sols, changement climatique).

Au-delà de cette expérience particulière de comparaison des deux approches, et grâce à l'expérience accumulée sur de nombreux terrains avec la méthode OUMC appliquée à l'évaluation de l'attractivité de systèmes de culture plus intensifs ou plus écologiquement intensifs que ceux pratiqués par les exploitants, je suis tenté de proposer ce qui suit comme cadre de réflexion sur l'évaluation multicritère de la durabilité dans le contexte des agricultures familiales des pays du sud. Dans ce contexte, il faut, avant de concevoir des innovations, se poser la question de savoir si ces innovations seront adaptées à des paysans qui resteraient pauvres, si elles doivent être des leviers de sortie de la pauvreté, ou si elles doivent être ciblées vers une agriculture qui serait sortie de la pauvreté grâce à des politiques favorisant leur intégration à un marché équitable des produits et des intrants agricoles. Les méthodes basées sur des indicateurs statiques ne me paraissent d'aucun secours pour l'évaluation multi-critères de la durabilité de systèmes de culture lorsque les exploitations auxquelles



on les destine ont toutes les chances d'avoir profondément changé dans un futur proche ou lorsqu'il n'y a pas d'espoir de concilier chez elles enjeux économiques, sociaux et environnementaux tant qu'elles n'ont pas radicalement changé en réponse à une amélioration substantielle de leur environnement socio-économique. Or la première situation, de transitions rapides des systèmes agraires, est généralisée aujourd'hui dans un grand nombre de pays émergents d'Amérique Latine et d'Asie et cela pourrait bien être le cas bientôt, espérons le, en Afrique. Et la seconde, où l'objectif de survie à court terme l'emporte nettement, dans les stratégies des producteurs, sur les préoccupations environnementales de long terme, a longtemps prévalu pour les exploitations vivrières d'Afrique sub-saharienne et prédomine encore dans bon nombre de régions de ce continent.

Ainsi, la méthode MAH appliquée de manière statique n'a d'intérêt, mais dans ce cas son intérêt paraît considérable, que lorsqu'on a à la fois une relative stabilité de l'environnement économique et une certaine marge de manœuvre économique des producteurs pour intégrer des critères environnementaux dans leur stratégie, par exemple au prix d'une baisse de revenu de court terme qui serait compensée à long terme, ou dans la perspective d'arrangements institutionnels à construire, qui compenseraient d'une manière ou d'une autre cette réduction de la performance strictement économique. Ce cas est encore assez rare chez les exploitants qui font l'objet de mes travaux....Mais c'est évidemment la situation dominante dans les pays développés et en Europe particulièrement, ce qui justifie peut être le succès de cette méthode dans cet environnement.

Les modèles bio-économiques d'exploitation en optimisation sous contraintes donnent en fait accès à un indicateur qui me paraît essentiel de l'opportunité économique du changement technique pour les exploitations familiales de polyculture-élevage, déjà mentionné plus haut : l'attractivité économique des systèmes de culture à l'échelle des exploitations. Un système de culture A est dit plus économiquement attractif à l'échelle de l'exploitation qu'un système de culture B si et seulement si son emploi augmente, par rapport à l'emploi de B, le revenu net du ménage, tout en restant compatible avec les principales contraintes de gestion de l'exploitation compte tenu des ressources de cette exploitation en terre, équipement, et force de travail, et des différentes spéculations agricoles ou extra agricoles pratiquées dans la région où se situent ces exploitations. Les indicateurs économiques classiques à l'échelle de la parcelle cultivée, que sont la productivité du travail et de la terre, ne sont généralement pas de bons indicateurs de la pertinence du choix entre deux systèmes de culture, non seulement parce qu'ils ne varient pas nécessairement tous deux dans le même sens entre deux systèmes de culture, mais aussi parce qu'ils ne rendent pas compte des compétitions entre activités multiples de l'exploitation pour la force de travail, la trésorerie, et les équipements. Les modèles OUMC font partie des rares outils qui permettent de résoudre cette difficulté en traitant du revenu de l'exploitation et de sa dépendance aux contraintes de mobilisation de la force de travail et de la trésorerie aux périodes critiques du système de production, mais aussi à des changements marqués de l'environnement des exploitations et à des changements des systèmes d'exploitation en réponse à ces changements de leur environnement, avec de surcroît la rigueur permise par la confrontation des prédictions des modèles avec des observations.

Grace à cela, ces modèles constituent un moyen privilégié d'évaluer dans quelle mesure l'environnement économique et la structure des exploitations dotent ces dernières d'une quelconque marge de manœuvre pour l'intensification écologique, et quels seraient les changements de leur environnement qui seraient susceptibles de créer cette marge de manœuvre. Cette

information, notamment si elle est prolongée par les sciences de l'économie rurale et de la politique agricole, peut contribuer non pas directement à la conception de systèmes de culture innovants, mais à la conception de politiques agricoles susceptibles de rendre envisageable la construction de la durabilité économique, sociale et environnementale de l'agriculture.

Pour le contexte des exploitations familiales du sud, il ne s'agit donc pas d'opposer OUMC et MAH comme deux méthodes d'évaluation multi-critères de la durabilité. Il me paraît plus intéressant de relever que la première offre la possibilité d'identifier de la marge de manœuvre pour intégrer d'autres critères que la simple survie économique à la durabilité, tandis que la deuxième est une méthode multi-critère d'évaluation de la durabilité adaptée aux situations où cette marge de manœuvre est avérée, sans d'ailleurs qu'on puisse aujourd'hui se prononcer à propos de son intérêt relatif, par rapport aux méthodes OUMC ou plus généralement MODM, pour cette application. Là encore, et cela ne doit pas surprendre puisqu'il s'agit de modélisation, une diversité d'approche est à favoriser.

### *Interdisciplinarité entre sciences biophysiques et sciences sociales*

CCA5, 2010 ; CCA4, 2007 CO2, 1996 ; CO3, 1996

Une agronomie systémique quantitative dont l'ambition est de contribuer à augmenter le revenu des agriculteurs pauvres est nécessairement articulée avec l'économie, et on a vu qu'il a été parfois question d'économie dans ce bilan de mes recherches. Je ne prétends pas avoir développé de compétences particulières m'autorisant à aborder l'économie comme chercheur, mais on remarquera que certains des articles auxquels j'ai contribué sont cosignés avec des économistes, certes pour certains agronomes de formation ce qui a certainement facilité notre collaboration, mais ayant réalisé leur thèse de doctorat en économie et ayant publié principalement dans cette discipline. C'est ainsi que le groupe d'agronomes du système de culture et d'économistes auquel j'ai collaboré a développé quelques compétences pour l'interdisciplinarité, et notamment pour une interdisciplinarité particulièrement exigeante, celle entre sciences biophysiques et sciences sociales, et à communiqué sur ce sujet à l'occasion de quelques congrès. La question des approches et pratiques de l'interdisciplinarité appartient elle-même aux sciences sociales et à l'épistémologie, et nous ne prétendons pas à un apport quelconque dans ce domaine, au delà d'une contextualisation au problème, fréquemment posé à l'agronomie, du changement d'échelle entre système de culture et exploitation. Nos communications ont également été conçues en réponse, là encore, aux injonctions, récurrentes dans le discours des institutions de recherche, à pratiquer cette interdisciplinarité. Cette interdisciplinarité est en effet maintes fois présentée comme essentielle pour les enjeux de notre temps, et l'on tente de l'encourager par des financements conditionnés à sa mise en œuvre, mais sans accorder le moindre égard à ses difficultés. Malgré la modestie de notre contribution, il m'a paru nécessaire de l'intégrer à ce bilan, car elle détermine certains aspects de mon projet de recherche.

Il faut d'abord noter que de nombreux travaux de modélisation « bioéconomiques des exploitations », utilisant la même méthode que nous c'est-à-dire OUMC, sont réalisés et publiés par des équipes tout à fait monodisciplinaires, soit d'agronomes du système de culture, soit d'économistes de l'agriculture. Les modèles de culture « génériques » ont d'ailleurs contribué à populariser l'idée, chez les économistes, qu'ils pouvaient se passer d'une collaboration directe avec les agronomes, dans la mesure où des modèles contenaient en quelque sorte de manière idéale la

connaissance des agronomes sur les performances des systèmes de production végétale en fonction de l'environnement. De même, des modèles d'exploitation à vocation générique sont souvent présentés comme le moyen offert par des économistes aux agronomes d'évaluer à l'échelle de l'exploitation la faisabilité et l'intérêt économique de systèmes de culture, sans avoir besoin de mobiliser des économistes, leur savoir étant capitalisé dans le modèle. Mon expérience des limites de la généricité notamment s'agissant de modèles conçus au Nord et qu'on souhaiterait appliquer au Sud, m'a conduit d'emblée à éliminer cette démarche, dès la 1<sup>ère</sup> occasion, en 1994, où j'ai souhaité coupler mon analyse des systèmes de culture avec une analyse à l'échelle des exploitations. Mais plus généralement, même si les modèles aux deux échelles étaient bien adaptés aux cas étudiés, les utiliser de manière monodisciplinaire implique tout de même, pour leur paramétrage comme pour l'analyse des résultats, la manipulation par une discipline d'un certain nombre de concepts de l'autre discipline, sans en connaître le domaine de validité et ses limites. Pour se prémunir des risques que cela comporte, certains chercheurs prétendent développer une double compétence d'agronome et d'économiste, mais le risque, qui m'a paru trop élevé me concernant, est de ne pas réussir à contribuer efficacement, à aucune des deux. Le groupe de deux agronomes et deux économistes que nous avons constitué pour la première étude à laquelle j'ai participé sur ce thème était plutôt naïf sur les difficultés de cette interdisciplinarité. Il a beaucoup évolué dans les 20 années suivantes dans sa composition et sa taille, sans jamais excéder 8 personnes et sans jamais se constituer comme entité formelle ayant une quelconque autonomie administrative, et donc en restant composée de personnels appartenant à des unités différentes, le plus souvent disciplinaires.

Les projets conduits par ce groupe n'ont naturellement pas toujours été reconnus comme prioritaires simultanément pour toutes les unités représentées, et cela a introduit des coûts de transaction importants entre nous et entre notre groupe et nos unités d'affectation, et contraint la disponibilité des uns et des autres de manière à telle que nos interactions autour de la construction des modèles, de l'analyse des résultats de simulation, ou de l'écriture des articles, étaient souvent sensiblement retardées par rapport à notre calendrier prévisionnel.

Nous avons dû consacrer chacun un temps significatif à l'apprentissage du langage et de la culture de l'autre discipline, ce qui ne veut pas seulement dire apprendre le vocabulaire spécifique de chacun, mais aussi accepter et comprendre que des termes partagés peuvent avoir des sens différents selon la discipline. Ce point constitue un piège particulièrement traître puisqu'on ne s'en aperçoit que lorsqu'un malentendu significatif se manifeste, par exemple par des tensions entre individus...

Nous avons rarement réussi à réunir les deux disciplines de notre groupe lors des conférences ou ateliers où nous avons présenté notre travail, difficulté peut être spécifique d'un groupe dont les chercheurs étaient affectés en des points dispersés du globe, mais qui a conduit chaque orateur à s'aventurer dans la manipulation en public de concepts qu'ils ne maîtrisait pas nécessairement, bien qu'éventuellement basiques pour l'autre discipline, et à s'exposer à des questions et critiques de la part de membres de l'assistance appartenant à l'autre discipline, sans pouvoir y répondre de manière appropriée. Un autre risque, en ces circonstances, est de tirer involontairement, en public, des conclusions du travail qui ne seraient pas nécessairement approuvées par les autres membres de l'équipe.

De manière répétée, et en fait à chaque nouveau projet et à chaque entrée dans le groupe d'un nouveau participant, sont apparues des frustrations et des doutes de la part d'un ou plusieurs

membres, appartenant à une discipline, à propos des aptitudes des membres de l'autre discipline. Chaque discipline semble en effet surestimer la capacité qu'à l'autre à expliquer la partie du monde sur laquelle porte ses recherches, et la découverte des limites des connaissances des autres membres introduit une forme de suspicion que cette limite n'est pas celle de la discipline mais de ceux qui la représentent dans le groupe... L'exemple suivant, imaginaire, illustre comment cet type de difficulté peut être particulièrement difficile à surmonter. A une époque où sont publiées régulièrement des prédictions par modèles de l'évolution des rendements et des bilans de carbone des cultures pour les 50 prochaines années, sous l'effet du changement climatique, et aux quatre coins de la planète, il y a un risque de ne pas être pris au sérieux quand on explique à des économistes qu'on est incapable de simuler l'évolution à long terme des rendements comparés des agricultures dites conventionnelles et de conservation dans une région donnée du monde dont on est supposé être expert... L'argument selon lequel nous ne sommes pas assez confiants dans notre modèle de culture pour l'appliquer à des prévisions à long terme est probablement beaucoup plus facile à exprimer devant un cercle de scientifiques biophysiciens, qui ne sont pas susceptibles de nous blâmer pour un excès d'honnêteté sur ce point, que devant des économistes, dont certains pourraient suspecter que notre apparent souci de rigueur nous serve à masquer nos faibles qualifications pour la modélisation.

Nous avons constaté une très forte dissymétrie entre l'agronomie et l'économie dans le temps et les moyens nécessaires aux tâches appartenant à chaque discipline : typiquement, l'agronomie demandait deux années de suivis de situations culturales en parcelles d'agriculteurs pour réunir les données relatives aux performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture à prendre en compte dans les modèles de fermes, là où l'économie de l'exploitation pouvait en général réunir toutes les données dont elle avait besoin en 3 à 6 mois d'enquêtes auprès des producteurs et sur les marchés. Cette disjonction entre les cycles de production des deux disciplines apportait d'un côté un certain confort à chacun, en permettant d'alterner les phases plus risquées de collaboration à des tâches véritablement interdisciplinaires, avec des périodes consacrées à des activités plus près de cœur de nos disciplines, avec ainsi des occasions pour chacun de poursuivre la construction de son crédit scientifique vis-à-vis de ses pairs. Mais d'un autre côté elle participe des forces qui tendent à repousser les chercheurs des interfaces entre les disciplines, forces contre lesquelles certains au moins des membres de l'équipe doivent lutter pour garantir que le projet atteigne ses objectifs. Or il peut résulter finalement, de cette lutte contre ces forces centrifuges par rapport au projet, le sentiment chez certains que l'autre discipline exerce une pression sur l'autre pour qu'elle produise les résultats attendus d'elle. Cette pression a pu être ressentie, dans notre expérience, comme s'exerçant aussi sur le niveau de détail ou de précision avec lequel une discipline doit fournir ses résultats comme intrants du travail de l'autre. Par exemple, les membres d'une discipline peuvent trouver que les membres de l'autre discipline tardent à produire leurs données car sont trop attachés à étudier certains détails sans importance pour le fonctionnement du système, ou au contraire que les seconds ont représenté le système de manière trop grossière pour valoriser les connaissances que les premiers apportent. Une manière relativement saine de résoudre ces tensions est d'appliquer les principes des analyses de sensibilité de manière à établir la robustesse des simulations et des conclusions qui en sont déduites, quitte à reprendre ensuite le travail de modélisation, avec éventuellement des campagnes supplémentaires d'enquêtes et de mesures, comme nous y avons été parfois conduits jusqu'à obtenir des simulations d'une robustesse suffisante pour que nous en apprenions quelque chose. Mais même ainsi, un certain nombre des résultats

produits par nos travaux ont été inattendus, voire très nettement contraires à ce qui était attendu, pour une partie ou une autre de l'équipe. C'est évidemment ce type de surprise qui fait toute la valeur ajoutée de l'interdisciplinarité, mais en même temps, la difficulté qu'a naturellement chacun à changer ses présupposés génère toute une série de questions concernant la qualité et la pertinence du travail de chaque membre de l'équipe, pouvant compromettre le désir de certains de poursuivre l'aventure.

Toutes les difficultés qui précèdent peuvent sans doute être rencontrées au cours d'une carrière très « mono disciplinaire », dès lors qu'elle comporterait un minimum de collaborations entre individus de points de vue quelque peu différents, mais nous avons largement sous estimé l'ampleur avec laquelle elles se manifestent dans le contexte de l'interdisciplinarité entre sciences sociales et biophysiques, et leurs conséquences en termes de frustrations et de tensions internes au groupe et de retards très importants dans notre production par rapport à ce qui était prévu initialement. Ces difficultés sont similaires à celles décrites par Naiman (1999) à partir de sa propre expérience de participation à des travaux interdisciplinaires ou de leur coordination. Cet auteur propose un certain nombre de lignes directrices pour réduire leur impact sur la qualité de la science (et des rapports entre les scientifiques, évidemment). Ces directives convergent la plupart du temps vers des principes de management favorisant le respect mutuel dans l'équipe, y compris au moment de choisir ceux qui assumeront la direction du groupe. Ceci suggère d'ailleurs qu'une équipe constituée sur décision d'une hiérarchie institutionnelle n'est pas nécessairement la meilleure formule pour favoriser l'interdisciplinarité. Une autre conséquence particulière pour des établissements voulant développer des travaux interdisciplinaires est que la méthode d'évaluation des performances individuelles et collectives des chercheurs devrait être conçue au moins de manière à ne pas décourager les efforts dans cette direction ! L'utilisation maladroite du seul nombre de publications de revues à facteur d'impact par individu et par an ne suffira peut être pas à éteindre toute volonté de s'impliquer dans des études interdisciplinaires, parce qu'heureusement il se trouvera toujours un certain nombre de scientifiques qui s'inquiètent moins de leur considération par d'autres que de ce qui excite leur curiosité. Mais si les établissements comptent sur cela, alors pour quoi ces indicateurs de performance sont-ils faits ? Par ailleurs, et ceci mérite d'être mentionné étant donnée la tendance des agences de financement de la recherche à favoriser de très grands projets, de petites équipes peuvent probablement mieux que les grandes construire le respect mutuel, gérer les déphasages entre cycles de production et la construction d'un langage commun. Il pourrait y avoir un seuil de taille, cependant, en-dessous duquel les tensions entre les disciplines sont susceptibles de se transformer rapidement en conflits entre personnes.

Afin de mieux prendre en compte les relations entre pouvoir et savoir en jeu dans l'interdisciplinarité, MacMynowski (2007) a proposé un processus de « différenciation, de clarification, et de synthèse » idéalement répété dans un cycle itératif au cours d'un projet, et dont les étapes ne sont dans la pratique pas nécessairement complètement disjointes temporellement. La première étape, la différenciation, consiste à rendre explicites les différences entre membres du groupe en termes d'objectifs, méthodes, rapports à la science et à l'objet étudié (par exemple les présupposés). L'étape de clarification consiste à rationaliser ces différences, à identifier ce qui les fonde quelle qu'en soit l'origine, y compris historique, sociale, etc..., à en questionner la cohérence et les alternatives. La phase de synthèse vient achever le cycle en déterminant ce qui est conservé, pour le travail, de ces différences, et ce qui doit être inventé pour aller de l'avant. C'est ce qui permet

d'identifier comment la recherche menée en commun peut apporter quelque chose de plus que la somme de ce que ferait chacun séparément.

## **Partie C**

### **Projet de recherche**





Mon projet aujourd'hui est dans la continuité directe de ce qu'il a été dès l'origine de ma carrière. Je pense avoir montré qu'il existe bien une question de la marge de manœuvre des agricultures familiales des pays du sud pour l'intensification écologique. Et qu'une agronomie du système de culture, articulée avec les sciences sociales, peut contribuer à caractériser cette marge de manœuvre de manière approfondie, donnant ainsi des clefs pour comprendre le poids que peuvent avoir les contraintes biophysiques, et notamment les interactions entre sol et climat, dans l'intensification agricole, comprendre pourquoi un « idéotype » de l'intensification écologique tel que l'agriculture de conservation n'est pas économiquement attractif pour un grand nombre d'exploitations familiales pauvres, et enfin comprendre dans quelles conditions elle ou d'autres approches de l'intensification écologique peuvent le devenir.

J'ai pu espérer, au début de ma carrière ou en tout cas avec la fin de la guerre froide à la fin des années 90, que ce type de questions perdrait progressivement de sa légitimité, et que la pauvreté rurale reculant, la question de l'innovation dans les systèmes de culture se pose et se traite, pour la majorité des exploitations agricoles du Sud d'une façon similaire à celle des exploitations du Nord, abstraction faite des différences de hiérarchies entre écosystèmes tempérés et tropicaux pour les variables biophysiques déterminant les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture. Effectivement, avec le cycle de développement des « Tigres » en Asie (Indonésie, Thaïlande, Malaisie, Philippines, Vietnam), accompagné de politiques agricoles qui avaient permis à un grand nombre d'agriculteurs de ces pays de sortir de la pauvreté, il était permis d'espérer que se généraliseraient progressivement à travers le monde, de telles politiques. Dans une certaine mesure, cela s'est produit également en Chine et Amérique Latine, au cours des 15 dernières années, où de très nombreux agriculteurs sont sortis de la pauvreté grâce à des investissements et des subventions facilitant leur accès à un marché rémunérateur du travail de production des produits vivriers, le développement du crédit à des taux faibles, et parfois le développement de l'assurance agricole. Cependant, les exploitations familiales à très faible revenu et à faible niveau de production par unité de surface restent largement majoritaires dans le monde tropical, principalement en Afrique au Sud du Sahara où la pauvreté atteint des niveaux tels qu'il est très fréquent que les ménages ruraux ne parviennent pas même à assurer leur sécurité alimentaire, mais aussi en Asie, Amérique Latine et sur la rive sud de la Méditerranée, y compris dans ceux de ces pays qui se sont le plus développés au cours des deux décennies passées. Il est ainsi toujours pertinent aujourd'hui d'identifier à quelles conditions de changement de leur environnement économique les exploitations peuvent augmenter à la fois leur revenu et leur contribution à la sécurité alimentaire locale, régionale ou globale, en mettant en œuvre une intensification écologique des systèmes de culture.

Bien entendu, un certain nombre d'éléments nouveaux infléchissent ce projet par rapport à son origine, dont le bilan a été tiré dans la partie précédente de ce mémoire. D'abord, une évaluation intégrée des systèmes de culture, dans l'objectif de produire des connaissances utiles à l'identification de politiques publiques favorables à l'intensification écologique, ce n'est pas *a priori* contradictoire avec une contribution à la conception de systèmes de culture. Un de fronts nouveaux de mon projet de recherche sera d'explorer davantage la complémentarité entre évaluation intégrée des systèmes agricoles, et évaluation pour la conception de prototypes de systèmes de culture. Ensuite le changement climatique est devenu un enjeu majeur pour l'agriculture qui doit à la fois s'y

adapter et contribuer à son atténuation. Un second front nouveau de ma recherche sera la prise en compte de cet enjeu dans ma démarche. Un autre enjeu important de notre temps est la construction collective des solutions aux problèmes complexes : en réponse à cet enjeu, j'étudierai une évolution de ma démarche multi-échelle d'évaluation des systèmes de culture pour qu'elle devienne également « multi-acteurs ». Enfin, au cœur de l'agronomie du système de culture comme au niveau des analyses bioéconomiques des exploitations et au plan des méthodes d'évaluation multi-échelle et multi-critères, un certain nombre de questions spécifiques nouvelles émergent du bilan que j'ai tracé dans la partie précédente de ce mémoire : les modèles de culture mobilisés pour l'évaluation des systèmes de culture doivent être améliorés pour mieux simuler les processus écologiques mobilisés dans l'intensification écologique et les questions relatives aux méthodes de modélisation, à une échelle donnée ou pour assurer le passage d'une échelle à une autre, restent largement ouvertes.

Ce projet mobilise ainsi une agronomie systémique quantitative articulée avec les sciences sociales.

L'ensemble de ce projet s'intègre parfaitement dans le projet scientifique de l'équipe ESCA de l'UR AïDA du Cirad, à laquelle j'appartiens depuis sa création en 2015. Il contribuera à une meilleure articulation entre évaluation et conception des systèmes de culture, à laquelle l'unité s'engage, en cohérence avec les recommandations formulées lors de son évaluation par l'AERES. Il sera centré sur les exploitations familiales des régions semi-arides à subhumides d'Afrique au sud du Sahara, et plus spécifiquement celles de ces exploitations dont le système de production végétale est fondé actuellement sur des cultures annuelles pluviales.

Les questions principales auxquelles mon projet prétend contribuer sont les suivantes :

- F  
uturs marchés, futur Climat, une place pour l'intensification écologique dans les futures fermes d'Afrique ? En fonction de scénarios d'évolution de l'environnement biophysique (y compris changement climatique) et économique de ces exploitations (y compris la démographie des familles rurales des régions où elles se trouvent), quelles sont les évolutions possibles des systèmes de production, avec quelle place de l'intensification écologique dans ces évolutions, quelles conséquences sur le revenu des exploitations, la sécurité alimentaire des ménages agricoles, la production, les systèmes de culture et leurs impacts environnementaux (dont atténuation du changement climatique) ?
- F  
utures fermes, futur climat : futurs systèmes de culture. Quelles innovations dans les systèmes de culture pourraient améliorer la durabilité économique, sociale et environnementale des systèmes de production au cours des transitions agraires déterminées par ces scénarios d'évolution de leur environnement biophysique et économique ? Comment éviter de concevoir des systèmes de culture pour des systèmes de production qui n'existeront plus quand la technologie sera au point ?

## 1. Futur marché, Futur Climat, une place pour l'intensification écologique dans l'agriculture familiale du futur ?

Il s'agit ici de développer une agronomie systémique quantitative, articulée avec l'économie et la science politique, pour la conception de politiques agricoles favorables à l'intensification agricole écologique des exploitations les plus pauvres. Pour cet axe de mes recherches, je m'appuierai sur l'approche que j'ai développée de la modélisation bioéconomique des exploitations, et les partenariats pluridisciplinaires qui y sont associés. Mes travaux antérieurs m'ont permis d'être invité à contribuer à deux projets de taille bien adaptée aux difficultés de l'interdisciplinarité et qui m'apportent les ressources nécessaires et les possibilités appropriées de développement de mes partenariats, vers l'économie toujours, mais aussi vers les sciences du climat, la sociologie et les approches participatives de la construction des solutions aux problèmes complexes. Ces deux projets sont centrés sur l'agriculture familiale des zones semi-arides à subhumides d'Afrique au Sud du Sahara, qui correspondent au cas le plus caractéristique des situations où l'agronomie du système de culture doit contribuer, à la conception de politiques agricoles. Il s'agit en premier lieu du projet ANR Escape, maintenant formellement achevé mais dont les travaux se poursuivent, et qui a réuni des agronomes (Cirad) des économistes (Cirad, CIREN), des climatologues (IRD, Météo France, CNRS, Université Pierre et Marie Curie) ainsi que des démographes et des sociologues des perceptions de l'environnement (IRD, université de Provence, Université Paul Sabatier Toulouse). Mes travaux dans ce projet portent sur la modélisation des rendements du mil, du maïs et de l'arachide dans le contexte du bassin arachidier Sénégalais pour différents types de cultivars, en fonction des contraintes hydriques et nutritionnelles. Le modèle *ad hoc* qui en résulte est baptisé CELSIUS pour Cereal and Legume crops Simulator Under Sahelian environment). Son rôle très spécifique, mais qui pourra être étendu après évaluation plus détaillée de son domaine de validité, est d'être couplé à un modèle de ferme, ANDERS (Agricultural and Development Economics model for the Groundnut basin in Senegal), développé en collaboration avec les économistes du CIREN et du Cirad, et qui simule les évolutions du système de production, de la production végétale et de celle de certains ateliers d'élevage, du revenu des producteurs et de la sécurité alimentaire des ménages, pour différents scénarios d'évolution de l'environnement des exploitations. Un premier travail avec ces modèles couplés a été soumis à la revue Agricultural Systems (PCL3, soumis) et a été intégré à la partie bilan de ce mémoire (section 3). On y évalue, sous hypothèse du climat actuel et pour 4 principaux types d'exploitations de polyculture élevage représentatives de l'agriculture du bassin arachidier sénégalais, l'efficacité relative de politiques d'incitation à l'intensification agricole qui consisteraient en subventions au crédit, à l'assurance contre les risques de sécheresse, aux engrais minéraux ou directement au revenu. Les travaux en cours visent à étendre l'analyse d'une part à d'autres environnements biophysiques et économiques de la région soudano-sahélienne, et d'autre part à se placer sous condition de climat futur, pour différents scénarios climatiques. Ils ont été l'occasion de travaux d'étudiants, co-encadrés avec Benjamin Sultan pour la climatologie impliquée dans ce travail (mémoires de Master/ spécialité d'ingénieur ME11, 2015, ME12 ; 2015), ou pour l'économie par Françoise Gérard pour un travail de Mastère Spécialisé (ME13, 2015) et feront l'objet d'une ou deux publications actuellement à l'état de projets.

Prenant le relais du projet ESCAPE, un projet financé par le NERC et le DFID Britanniques (National Education and Research Council, et Department For International Development) débute maintenant et associera une partie des participants, économistes, climatologues, agronomes du projet ESCAPE, à des physiciens de l'atmosphère engagés dans la modélisation de la mousson africaine, à de nouveaux agronomes, modélisateurs expérimentés de l'étude des impacts agricoles du changement climatique, à des sociologues, et des généticiens et sélectionneurs. Ce projet me permettra de prolonger le travail commencé dans ESCAPE pour le soumettre à discussion critique des acteurs de l'agriculture. Une des approches suivies sera de rendre, par un travail d'ingénierie logicielle et de documentation didactique, le modèle couplé ANDERS-CELSIUS utilisable en modélisation participative puis d'utiliser, en collaboration avec les sociologues de l'université de Sussex, ce nouvel outil pour discuter et modifier les hypothèses contenues dans nos modèles, les scénarios testés en termes de politiques, de technologies disponibles pour les systèmes de culture ou l'élevage, d'évolution du climat ou de la fertilité des sols. Une autre approche consiste à utiliser plutôt des jeux de plateaux multi-acteurs, conçus pour traiter la même question que celle traitée par modélisation bioéconomique. Cette idée a déjà été mise en œuvre à titre exploratoire en 2015 (Fig.11) en collaboration avec les spécialistes de ces jeux que sont P. D'Aquino (Cirad, UPR GREEN) et Jeremy Bourgoin (Cirad, UMR TETIS). Cela a paru prometteur pour identifier des éléments importants du problème qui seraient délicats à modéliser ou qui auraient échappé aux modélisateurs, et pour relativiser les conclusions issues de l'exercice de modélisation, en fonction d'hypothèses sur l'impact de ces facteurs négligés. Dans notre cas ces facteurs peuvent être par exemple les aspects subjectifs du rapport des agriculteurs aux politiques agricoles, au système biophysique exploité, aux technologies disponibles, aux services bancaires et d'assurance, tout comme symétriquement les représentations qu'on les décideurs politiques des stratégies des producteurs. Les acteurs qui seraient associés à ce travail dans les deux types d'approche pourraient être des agriculteurs, leurs organisations professionnelles émergentes, les chercheurs et techniciens des services de recherche agronomique et d'appui aux producteurs, les agents des services publics impliqués dans la conception des politiques agricoles, ou encore les acteurs du secteur de l'assurance et du crédit agricoles.

Du point de vue de l'agronome que je suis, l'idée est d'identifier, avec les acteurs intervenant aux échelles englobant celle de nos travaux, d'une part ce que les connaissances que nous développons sur les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture peuvent apporter à la conception de politiques agricoles, et d'autre part, symétriquement, ce que les points de vue de ces autres acteurs peuvent nous apporter en termes de nouvelles questions ou d'hypothèses à reformuler pour notre échelle d'analyse.



**Figure 11. Test d'un prototype de jeu de plateau conçu pour traiter la même question qu'avec le modèle bio-économique ANDERS-CELSIUS.**

Au-delà de ces projets déjà initiés, je m'efforcerai de renforcer mes partenariats par l'intégration de macro-économistes et de spécialistes des politiques agricoles, et en termes de terrains d'étude, de couvrir également des cas en Amérique Latine et en Asie, où l'on a la possibilité d'éprouver la capacité de nos modèles bio-économiques à restituer fidèlement les trajectoires parcourues par les systèmes d'exploitation au cours des 20 dernières années, pendant lesquelles les économies émergentes de ces régions ont permis des transitions agraires de grande ampleur. Une telle étude permettrait de renforcer sensiblement la confiance que l'on pourra accorder aux extrapolations de nos modèles pour le futur des exploitations africaines.

## **2. Futures fermes, futurs climats : futurs systèmes de culture écologiquement intensifs**

Il s'agit ici de développer une évaluation multicritère des systèmes de culture, articulée avec la conception de systèmes de culture pour l'intensification écologique, et qui tienne compte des dynamiques parfois extrêmement rapides des systèmes de production lorsque l'environnement économique des exploitations devient favorable à l'intensification agricole. Pour cet axe de mon projet de recherche, il s'agit comme pour le précédent de mobiliser la modélisation bioéconomique (au sens large, pas nécessairement de type OUMC), mais selon un angle sensiblement différent. L'objectif spécifique principal des modèles bioéconomique dans ces travaux est de calculer un indicateur clef de la durabilité économique des systèmes de culture; leur attractivité économique à l'échelle de l'exploitation, telle qu'elle a été définie à partir de nos travaux antérieurs. Il faudra consolider ce concept, et notamment la manière dont il peut être utilisé de manière prospective pour anticiper du mieux possible les évolutions des systèmes de production et ainsi contribuer au

cahier des charges de la conception pour les étapes à venir des transitions agraires. Cet indicateur économique adapté aux exploitations familiales complexes et fortement contraintes devra être confronté à d'autres indicateurs, notamment sociaux et environnementaux pour aider à la décision collective sur les systèmes de culture correspondant à un compromis sur la durabilité adapté aux systèmes de production

Il faudra en premier lieu développer des méthodes rapides et peu coûteuses, pour estimer cette attractivité économique, pour être capable d'alimenter en temps utile des démarches d'évaluation multicritères, dans le cas où l'on peut s'attendre à des évolutions rapides et profondes des systèmes de production à moyen, voire à court terme. Cette composante de mon projet pourra s'appuyer en partie sur les deux projets identifiés pour l'axe précédents, en se concentrant sur certaines régions d'Afrique, telles, en Afrique de l'ouest, que la frange sud des climats soudano sahéliens (mais également en de nombreux points à travers toute l'Afrique) où une intensification agricole semble se dessiner à moyen terme. L'objectif spécifique sera de contribuer à concevoir des systèmes de culture susceptibles de favoriser les trajectoires des exploitations vers une meilleure durabilité. Mais c'est surtout en Asie du Sud Est continentale, où nous disposons d'un projet consistant (projet UE-EuropAid / AFD ; Landscape management and Conservation Agriculture development for Eco-Friendly Intensification and Climate Resilient Agricultural Systems in Lao PDR - EFICAS), avec un partenariat avec des spécialistes des transitions agraires à l'échelle du système agricole et des spécialistes de la conception de systèmes de culture, où cette intensification agricole est en cours de manière évidente et où l'on peut actuellement, selon les localités où l'on se place, accéder à pratiquement tous les stades des transitions agraires entre l'agriculture itinérante sur abattis brûlis et les exploitations de polyculture élevage à cultures continues intensives.

Mais il faudra aussi améliorer considérablement la capacité des modèles de culture à estimer les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture existants et des « idéotypes » de systèmes de culture écologiquement intensifs susceptibles de représenter le futur à long terme pour une agriculture familiale durable des zones semi-arides à subhumides des régions tropicales. Cela implique d'améliorer notre capacité à prendre en compte le changement climatique et les compétitions et facilitations entre espèces dans les modèles de simulation, à l'échelle de la situation culturale.

Améliorer notre capacité à prendre en compte à cette échelle l'impact du changement climatique, pour les céréales et légumineuses tropicales implique d'intégrer dans les modèles les effets de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et des températures élevées sur l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse, et l'effet de la concentration en CO<sub>2</sub> la sensibilité des cultures au stress hydriques. Il est également nécessaire de mieux identifier la relation entre les températures élevées et le nombre d'organes reproducteurs. Concernant ces processus, les relations générales entre variables sont connues et plusieurs formalismes mathématiques sont reconnus comme pertinents pour les représenter, mais les paramètres de ces relations sont connus avec une précision insuffisante, et cela tout particulièrement pour les mils, sorghos et riz pluviaux, c'est-à-dire en quelque sorte les céréales des pauvres, nettement moins étudiées que blé, maïs ou riz irrigué. Je ne traiterai pas directement ces questions, appartenant davantage à l'écophysiologie, mais je maintiendrai des liens étroits avec les équipes qui les traitent, avec le souci notamment que leurs dispositifs et les nôtres aient en commun des cultivars représentatifs du matériel végétal actuellement employé par les producteurs de nos terrains d'étude. Les équipes concernées sont au

sein d'AïDA l'équipe GESC (Génétique Environnement Systèmes de Culture), pour les travaux qu'elle développe sur le riz pluvial et le coton, à l'UMR AGAP l'équipe PAM- Plasticité Phénotypique et Adaptation des Monocotyledones) travaillant sur le sorgho. Le dispositif prioritaire ASAP (Intensification écologique et conception des innovations dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux de l'Afrique de l'Ouest ) couvrant le Sud du Burkina Faso, ainsi que le dispositif prioritaire SPAD (Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité) à Madagascar représentent deux opportunités notables pour cette collaboration, avec des équipes réunissant un ou deux agronomes de AïDA et un ou deux écophysiologistes de GESC ou AGAP, des renforcements équilibrés étant encore envisagés par ces 3 équipes.

La simulation des impacts du changement climatique pose aussi d'autres problèmes que des améliorations spécifiques des modèles de culture. En effet les climats futurs prédits par les modèles des climatologues, ne sont pas directement comparables à des séries historiques d'observations météorologiques réalisées en une localité à l'aide de stations météorologiques, car ils ne sont pas obtenus avec la même résolution spatiale et temporelle. Les opérations mathématiques conduisant à rendre possibles ces comparaisons sont complexes et entachées de nombreux biais qui dépendent de la méthode choisie et donc de l'objectif poursuivi par cette méthode. La collaboration avec les climatologues est essentielle pour une utilisation raisonnée des prédictions de climat dans les analyses agronomiques. Les travaux que j'ai initiés sur ce thème à l'occasion de deux stages de master co-encadrés avec Benjamin Sultan permettent de poser déjà quelques jalons. Le projet AMMA2050 sera l'opportunité de pousser cette réflexion plus avant, notamment au sein d'un groupe de travail modélisation des cultures transversal à tous les projets du programme « Future Climate of Africa » dans le cadre duquel AMM2050 est financé. Une collaboration sur ce thème est également engagée dans le cadre du projet AgMip. Ce programme comporte une activité de mise en réseau de compétences en modélisation des cultures, auquel je participe, et qui devrait faciliter cette recherche.

La série de travaux conduits au Brésil par notre équipe sur l'évaluation comparée des flux des ressources Eau, Azote et Carbone dans les systèmes de cultures avec labour et en agriculture de conservation ont mis en évidence un certain nombre de lacunes des modèles pour les environnements tropicaux, rendant notamment très imprécises les estimations des flux d'azote liés à la décomposition puis la minéralisation des pailles enfouies ou placées en surface, de telle sorte qu'il nous est encore très difficile de prédire les circonstances dans lesquelles des plantes associées peuvent être en compétition pour l'azote ou au contraire les cas où des facilitations entre espèces sont probables. Il est également clair que l'intensification écologique nous oblige à renoncer à l'hypothèse si commode que les adventices sont absentes des cultures des lors qu'on a appliqué des techniques agronomiques efficaces pour en venir à bout. Il devient ainsi difficile de prétendre simuler les performances des systèmes de culture en ignorant les compétitions entre adventices et plantes cultivées pour le rayonnement, l'eau ou les nutriments. C'est donc un travail ambitieux de modélisation qu'il faut poursuivre, d'autant qu'il sera nécessaire de couvrir la grande diversité des environnements de notre domaine d'étude, très insuffisamment représenté par les sites que nous avons utilisés jusqu'ici dans les *Cerrados* brésiliens. Là encore les dispositifs dans lesquels nous sommes implantés et dans lesquels nous renforçons progressivement notre présence, en Afrique de l'Ouest, à Madagascar, en Afrique Orientale et au Laos, devraient nous permettre de relever ce défi. Nous y constituons en effet progressivement les dispositifs d'essais en station expérimentales, de réseaux de situations culturelles en parcelles d'agriculteurs, et d'enquêtes en exploitations agricoles,

ainsi que les équipes de jeunes agronomes, et les aidons à construire leurs partenariats avec les généticiens, écophysiologistes, écologues, climatologues, géographes et économistes qui rendent cette agronomie prometteuse car à la fois claire sur son échelle de compétence mais intégrée dans un continuum d'échelles et de compétences qui correspond à l'enjeu de contribuer à résoudre des difficultés qui se manifestent à toutes les échelles de l'agriculture.



## References citées

- Adam, M. et al., 2012. Protocol to support model selection and evaluation in a modular crop modelling framework: An application for simulating crop response to nitrogen supply. *Computers and Electronics in Agriculture*, In Press.
- Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*, 52(1/2): 79-93.
- Affholder, F. et al., 2006. Risques de stress hydrique sur les cultures dans les Cerrados Brésiliens. Du zonage régional à l'analyse des risques à l'échelle des exploitations familiales. *Cahiers Agricultures*, 15(5): 433-439.
- Affholder, F., Jourdain, D., Morize, M., Quang, D.D. and Ricome, A., 2008. Eco-intensification dans les montagnes du Vietnam. Contraintes à l'adoption de la culture sur couvertures végétales. *Cahiers Agricultures*, 17(4): 289-296.
- Alexandratos, N. and Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050, the 2012 revision., Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Baron, C., Reyniers, F., Clopes, A. and Forest, F., 1999. Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et Développement*(24): 89-95.
- Bommarco, R., Kleijn, D. and Potts, S.G., 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4): 230-238.
- Bonny, S., 2011. L'agriculture écologiquement intensive : nature et défis. *Cahiers Agricultures*(20): 451-462.
- Boserup, E., 2005. The conditions of agricultural growth: The economics of agrarian change under population pressure. Transaction Publishers.
- Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar, H.H. and Rabbinge, R., 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 52(2-3): 171-198.
- Breman, H. and Sissoko, K., 1998. L'intensification agricole au Sahel, *Economie et développement*. Karthala, Paris, pp. 1000 p.
- Brisson, N. et al., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, 18: 309-332.
- Brisson, N. et al., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6): 311-346.
- Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *National Academy of Sciences colloquium*, 96(11): 5952-5959.
- Chalmers, A.F., 1976, 2006. Qu'est-ce que la Science ? La découverte, Paris.
- Chevassus au Louis, B. and Griffon, M., 2008. La nouvelle modernité: une agriculture productive à haute valeur écologique. *Déméter: Économie et Stratégies Agricoles*, 14: 7-48.
- Collomb, P., 1999. une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici 2050, Rome, Paris, 197 pp.
- Conway, G., 1997. The doubly green revolution. Food for all in the twenty-first century, The doubly green revolution. Food for all in the twenty-first century. Penguin Books Ltd, London UK, pp. xv + 335 pp.
- Conway, G. and Griffon, M., 1994. Une agriculture durable pour la sécurité alimentaire mondiale. Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale (USA). Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Paris (France).
- Coquillard, P. and Hill, D.R.C., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson, Paris, 293 pp.

- Corbeels, M. et al., 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187: 155-170.
- Dingkuhn, M. et al., 2003. Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In: T.E. Struif-Bontkes and M.C.S. Wopereis (Editors), *A Practical Guide to Decision-support Tools for Agricultural Productivity and Soil Fertility Enhancement in Sub-Saharan Africa*. IFDC, CTA, pp. 127-139.
- Diouf, M., 1990. Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. These Thesis, INA-PG, Paris, 227 pp.
- Dixon, J.A., Gibbon, D.P. and Gulliver, A., 2001. Farming systems and poverty: improving farmers' livelihoods in a changing world. Food & Agriculture Org.
- Dore, T. et al., 2008. Methodological progress in on-farm regional diagnosis. A review. *Agron Sustain Dev*, 28.
- Doré, T. et al., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34(4): 197-210.
- Dore, T., Sebillotte, M. and Meynard, J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems*, 54(2): 169-188.
- Egger, K., 1987. L'intensification écologique conservation (LAE) et amélioration des sols tropicaux par les systèmes agro-sylvo-pastoraux, In : *Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production*. - Montpellier : CIRAD-DSA, 1987(Documents systèmes agraires; 2,6), pp. p.129-135 (7 p.).
- Evenson, R.E. and Golin, D., 2003. Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 300: 758–762. .
- FAO, 2003. In: J. Bruinsma (Editor), *World Agriculture: Towards 2015/2030: an FAO Perspective*. FAO, Earthscan, Rome, pp. 432.
- FAO, 2006. *World Agriculture Towards 2030–2050. Global Perspective Studies Unit*, FAO, Rome, 71 pp.
- Forest, F., 1996. Le diagnostic hydrique à la parcelle pour une meilleure compréhension des risques agroclimatiques en milieu tropical. Présentation du logiciel SARRA. In: B.-C.M. Reyniers François (Editor), *Couplages de modèles en agriculture. Colloques*. CIRAD, Montpellier, France, pp. 33-35.
- Forest, F. and Cortier, B., 1991. Characterization of the adequacy of crop water supply and regional yield forecasting for millet cultivated in CILSS countries. Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone. Proc. workshop, Niamey, 1991: 547-557.
- Freud, C., 2005. Evaluation de l'impact économique des systèmes de culture sur couvert végétal (SCV) au Brésil et à Madagascar, Montpellier.
- Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. and Tittonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: the heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23-34.
- Griffon, M., 1995. Succes et limites des revolutions vertes, Succes et limites des revolutions vertes, CIRAD-Montpellier, France, pp. 1-182.
- Hammer, G.L. and Muchow, R.C., 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. I. Development and testing of a simulation model. *Field Crop Research*, 36: 221-234.
- Hochman, Z. et al., 2013. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. *European Journal of Agronomy*, 44: 109-123.
- Hyman, G. et al., 2008. Strategic approaches to targeting technology generation: Assessing the coincidence of poverty and drought-prone crop production. *Agricultural Systems*, 98(1): 50-61.
- Jouve, P., 1984. Le diagnostic agronomique préalable aux opérations de Recherche-Développement. *Cahiers de la Recherche-Développement*(3-4): 67-76.

- Keating, B.A., Herrero, M., Carberry, P.S., Gardner, J. and Cole, M.B., 2014. Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, 3(3-4): 125-132.
- Koning, N. and van Ittersum, M.K., 2009. Will the world have enough to eat? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1): 77-82.
- Legay, J.M., 1996. L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode. *Sciences en question*. INRA, Paris.
- Leterme, P., Manichon, H. and Roger-Estrade, J., 1994. Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie*, 14: 341-361.
- Losch, B., 2014. Les agricultures familiales: au cœur de l'histoire des agricultures du monde. In: J.-M. Sourisseau (Editor), *Agricultures familiales et mondes à venir*. Quae, Versailles, pp. 19-41.
- MacMynowski, D.P., 2007. Pausing at the brink of interdisciplinarity: Power and knowledge at the meeting of social and biophysical science. *Ecology and Society*, 12(1): 14.
- Maltas, A., 2007. Analyse par expérimentation et modélisation de la dynamique de l'azote dans les systèmes sous semis direct avec couverture végétale des Cerrados Brésiliens. PhD Thesis, SupAgro, Montpellier, 219 pp.
- Maltas, A. et al., 2007. Long-term effects of continuous direct seeding mulch-based cropping systems on soil nitrogen supply in the Cerrado region of Brazil. *Plant and Soil*, 298: 161-173.
- Maltas, A., Corbeels, M., Scopel, E., Wery, J. and da Silva, F.A.M., 2009. Cover Crop and Nitrogen Effects on Maize Productivity in No-Tillage Systems of the Brazilian Cerrados. *Agronomy Journal*, 101(5): 1036-1046.
- Manichon, H. and Sebillote, M., 1973. Etude de la monoculture du maïs. Résultats d'une enquête agronomique dans les régions de Garlin et Navarrenx (Pyrennées Atlantique, France). Doc. Chaire D'Agronomie, 140p., INA-PG, Paris.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G. and Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277(5325): 504-509.
- Mazoyer, M., 2001. Protéger la paysannerie pauvre dans un contexte de mondialisation, FAO, Rome.
- Mazoyer, M. and Roudart, L., 1997. Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine. Seuil, Paris, 546 pp.
- Murdoch, W., 1985. La Faim dans le Monde. Surpopulation et sous alimentation (The Poverty of Nations. The Political Economy of Hunger and Population). Johns Hopkins University Press (1980), Dunod, Bordas (1985), Paris, 422 pp.
- Naiman, R.J., 1999. A perspective on interdisciplinary science. *Ecosystems*, 2(4): 292-295.
- Naudin, K. et al., 2014. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agricultural Systems*, 134: 36-47.
- Paillard, S., Treyer, S. and Dorin, B. (Editors), 2010. Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050. Quae, Versailles, 295 pp.
- Pannell, D.J., Llewellyn, R.S. and Corbeels, M., 2014. The farm-level economics of conservation agriculture for resource-poor farmers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187: 52-64.
- Passioura, J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal*, 88(5): 690-694.
- Rossetti, L.A., 2001. Applying agricultural zoning for financing and rural security in Brazil : Agricultural policy and actuarial aspects. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9(3): 378-386.
- Sadok, W. et al., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1): 163-174.
- Samba, A., 1998. DHC software programs to assess crop production in terms of moisture status: forecasting millet yields in Sudano-Sahelian areas of West Africa. *Secheresse*, 9(4): 281-288.

- Sebillotte, M., Boiffin, J., Caneill, J. and Meynard, J.M., 1978. Sécheresse et fertilisation azotée du blé d'hiver, Essai d'analyse de situations au champ par des composantes du rendement. Bull. l'AFES, 3: 197-213.
- Séguy, L., Bouzinac, S., Trentini, A. and Cortes, N.A., 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. Agriculture et Développement(12): 3-61.
- Sinclair, T.M. and Seligman, N.G., 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. Agron. J., 88: 698-704.
- Sourisseau, J.M. (Editor), 2014. Agricultures familiales et mondes à venir. Quae, Versailles, 360 pp.
- Tiffen, M. and Mortimore, M., 1994. Malthus controverted: The role of capital and technology in growth and environment recovery in Kenya. World Development, 22(7): 997-1010.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. and Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(50): 20260-20264.
- Traore, S.B. et al., 2014. AGRHYMET: A drought monitoring and capacity building center in the West Africa Region. Weather and Climate Extremes, 3: 22-30.
- van Ittersum, M.K. et al., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. Field Crops Research, 143(0): 4-17.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. and Melillo, J.M., 1997. Human domination of Earth's ecosystems. Science, 277(5325): 494-499.